Рудольф Сворень

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

ШАГ ЗА ШАГОМ

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО ШАГ ЗА ШАГОМ

SHOUT
SHARE
IT

Annotation

В книге весьма подробно и в то же время очень доступно рассказано об электричестве и его использовании в энергетике и связи. Используя 400 специально разработанных иллюстраций, автор рассказывает об истории изучения электричества, о сложившихся основных системах постоянного и переменного тока и о той важной роли, которая досталась электричеству в энергетике нашего мира. Рудольф Анатольевич Сворень — автор многих популярных книг о физике и электронике, известный научный журналист, радиоинженер и кандидат педагогических наук, много лет проработавший в редакции журнала “Наука и жизнь” заместителем главного редактора.

- Рудольф Анатольевич Сворень
  - Глава 1
  - Глава 2
  - Глава 3
  - Глава 4
  - Глава 5
  - Глава 6
  - Глава 7
  - Глава 8
  - Глава 9
  - Глава 10
  - Глава 11
  - Глава 12
  - Глава 13
  - Глава 14
  - Глава 15
  - Глава 16
  - Глава 17
  - Глава 18
  - Глава 19
  - Глава 20
  - Глава 21
  - Напутствия с надеждой

Рудольф Анатольевич Сворень
«ЭЛЕКТРИЧЕСТВО ШАГ ЗА ШАГОМ»

Глава 1
Десять важных предупреждений

Взяв в руки новую книгу, мы довольно часто не читаем предисловие или, в лучшем случае, быстро полистав его, начинаем всё же с основных разделов. Очень хочется, чтобы читатель отошёл от этой технологии — наше предисловие не случайно названо первой главой, оно само есть важный раздел книги, который должен облегчить знакомство со всеми последующими главами. Если, конечно, вы решитесь на это знакомство.

Т-1. **Очень может быть, что читателю эта книга совершенно не нужна.** Вряд ли найдутся в наше время люди, которые не сталкивались с электричеством, — куда ни посмотришь, оно помогает нам, работает на нас. Электричество — это яркий свет в домах и тысячи разных станков на заводах, это телевизор и телефон, компьютер и электропоезд метрополитена. Если где-нибудь на далёкой планете тамошние астрономы наблюдают за нами в свои телескопы, то они видят, как на тёмной половине Земли появляются, а через какое-то время медленно гаснут загадочные световые пятна. Это наши города миллионами включённых электрических ламп встречают ночь и постепенно засыпают.

А ведь ещё каких-то сто лет назад электрическая лампочка считалась сложным физическим прибором, чудом науки и техники.

Несколько поколений исследователей и инженеров, приручавших электричество, сделали так, что пользоваться электроприборами легко и просто, — для этого не нужны какие-либо специальные знания. Тронул пластмассовый рычажок выключателя — и в комнате стало светло, включил телевизор — и по зелёному полю забегали футболисты в синих и оранжевых майках, нажал кнопку в лифте — и он послушно повёз тебя на нужный этаж. А что там при этом происходит, как работает электричество, что именно оно делает в телевизоре, в лифте или в электрической лампочке, — об этом можно и не задумываться. Наше дело простое: знаешь, какую кнопку нужно нажать, и достаточно.

Действительно, нельзя же объять необъятное. У нас на службе огромное многообразие аппаратов, приборов, машин, и совсем не

обязательно знать, как всё это устроено и как работает. Зашёл в самолёт, сел в кресло, пристегнул ремень — и лети спокойно, не спрашивай у стюардессы, чем отличается реактивный двигатель от поршневого или как называются страны, над которыми полетит самолёт. Научился нажимать на педали и управляться с рулем автомобиля — садись и двигай, нечего выяснять, как устроены дисковые тормоза или бензонасос. Даже на компьютере можно прекрасно работать, абсолютно не понимая, как именно он превращает лёгкое нажатие на клавиши в сложные преобразования рисунков, чисел или слов.

Эта книга сравнительно подробно рассказывает об электричестве, о том, как люди с ним познакомились, как изучили повадки электричества, заставили его работать на себя. Будет кое-что рассказано и о том, как устроены электрические приборы и машины, где и как добывают электрическую энергию, как передают её в наши дома и на заводы. А чтобы вы могли воспринимать всё это с пониманием сути дела, мы начнём с рассказов о физической природе электричества и его ближайшего родственника — магнетизма.

Вполне вероятно, что читатель не проявляет интереса ко всем этим подробностям и ему, возможно, не стоит тратить на них время. Так что подумайте, может быть, лучше из приличия полистать книжку и решительно отложить её в сторону, честно признавшись: это не для меня.

Т-2. **В то же время есть немало людей, которым не обойтись без знакомства с электричеством, и книга поможет сделать в этом деле первые шаги.** Тот, кто выберет электрические процессы и машины своей профессией, непременно должен будет изучить электричество подробно, до мелочей, и сделать это можно только с помощью серьёзных учебников. Книги, подобные этой, могут оказаться полезным предисловием к учебнику — они начинаются с «нулевой отметки», то есть предполагают, что вы вообще ничего не знаете про предмет. Поэтому книга вводит вас в существо дела постепенно, рассказывает обо всём хоть не очень строго, но зато простым языком, приучает к терминам, готовит к будущему детальному изучению электричества.

Т-3. **Многие получат от знакомства с электричеством реальную пользу, хотя напрямую с ним не связаны.** Книжка может оказаться полезной и для тех, кто не выбрал электричество основной профессией, с ним в своей работе наверняка столкнётся шофёр, сварщик, строитель, врач, геолог, космонавт, металлург, словом, люди самых разных профессий. Им книжка может дать некоторый объём основных знаний, позволяющих потом по мере

надобности вникать в детали.

***Т-4*. Кое-что об электричестве полезно знать даже тем, кто терпеть не может точные науки и совершенно не интересуется техникой**. Вполне вероятно, что желание познакомиться с электричеством появится и у того, кому это знакомство вроде бы и не нужно. Психологи экспериментально определили, что на шкале наших жизненных ценностей на очень высоком уровне находятся знания. Доказано, что потребность в знаниях связана с так называемыми безусловными рефлексами, которые передаются по наследству с древнейших времен. Знать окружающий мир — потребность столь же сильная, как жажда или чувство голода. Она наверняка появилась в далёком-далёком прошлом, когда сама жизнь человека зависела от его знаний — от того, как он умеет охотиться, добывать пищу, уходить от опасностей.

Вот почему мы чувствуем какой-то дискомфорт, какое-то явное неудобство, если не имеем хотя бы самых общих представлений об окружающем мире, об основах наук и технологий, об основах жизни общества. Человеку любой профессии, с любым уровнем образования нужна, как принято говорить, картина мира, пусть не очень подробная, но без серьёзных пробелов. Не случайно во многих американских университетах даже гуманитариям — будущим юристам, историкам, литераторам — в небольших дозах преподают точные науки. Для них даже специальные учебники есть, например «Физика для поэтов».

Книжка, которую вы сейчас держите в руках, позволит, как уже говорилось, почерпнуть наиболее важные сведения об электричестве и, хочется верить, поможет даже неподготовленному читателю ликвидировать «электрическое белое пятно» в его картине мира.

ВК-1. *Человек с давних времён интересуется нашим миром, пытается понять, как в нём всё устроено. Много тысяч лет главной движущей силой этого интереса было применение новых знаний для улучшения своей трудной жизни — изобретения тех времен, добывание огня, колесо, капканы, парусные лодки. Электричеством стали серьёзно заниматься лет 500 назад, а основные открытия и их применение начались ещё через 300 лет. Сегодня мы знаем важнейшую роль электричества в природе и технике, без этих знаний не может быть создана никакая картина мира.*

Т-5. **Предлагаемая читателю книга, так сказать, многоэтажка, в ней, в частности, есть тематические этажи, разные по уровню сложности**. Если вы решились на знакомство с электричеством и готовы двигаться дальше по страницам этой книги, то вам прежде всего полезно будет узнать, как она устроена.

Нужно сразу сказать — электричество для человека область непривычная: с механикой или с тепловыми процессами люди знакомы много тысячелетий, а электричеством всерьёз стали заниматься всего лет триста назад. Ко всему ещё основные электрические процессы скрыты от нас, чтобы судить о них, нужно понимать, что происходит в невидимых электрических мирах. Можно прекрасно собрать велосипед, не зная теории механизмов и машин, можно ловко пилить дрова, не зная теории резания, но вряд ли поймёшь, как работает какая-нибудь электрическая машина, если не знаешь основ электротехники, если не построил для себя хоть какой-то теоретический фундамент. Значительная часть книги как раз и посвящена построению такого фундамента.

Есть люди, которые к слову «теория» относятся с пренебрежением. А ведь это несправедливо. Теория — это сконцентрированный опыт миллионов исследователей, собранные, приведённые в систему правильные решения, отброшенные в сторону бессчётные ошибки. Теория — это молниеносные мысленные эксперименты вместо долгих и дорогостоящих опытов «в металле», быстрый выбор правильного ответа вместо бесконечного слепого перебора и гадания. Теория — это кратчайший путь к нужному практическому результату. Прекрасно сказал об этом великий итальянский физик Энрико Ферми: «Нет ничего практичнее хорошей теории».

В этой книге теоретический материал имеется во всех её главах. В каждой главе есть некоторое количество сравнительно

небольших разделов, они имеют сквозную нумерацию по всей книге и обозначаются буквой «Т» — от слова «теория». Конечно же, эти разделы не очень похожи на теорию в истинном высоком смысле этого слова, теорию, насыщенную математикой, охватывающую весь комплекс вопросов, связанных с темой. Основной текст книги — это очень краткий и по возможности предельно упрощённый пересказ некоторых элементов теории, так что теорией его можно называть только условно. Более того, если слово «теория» пугает вас, то можно считать, что обозначение «Т» идёт от слова «текст».

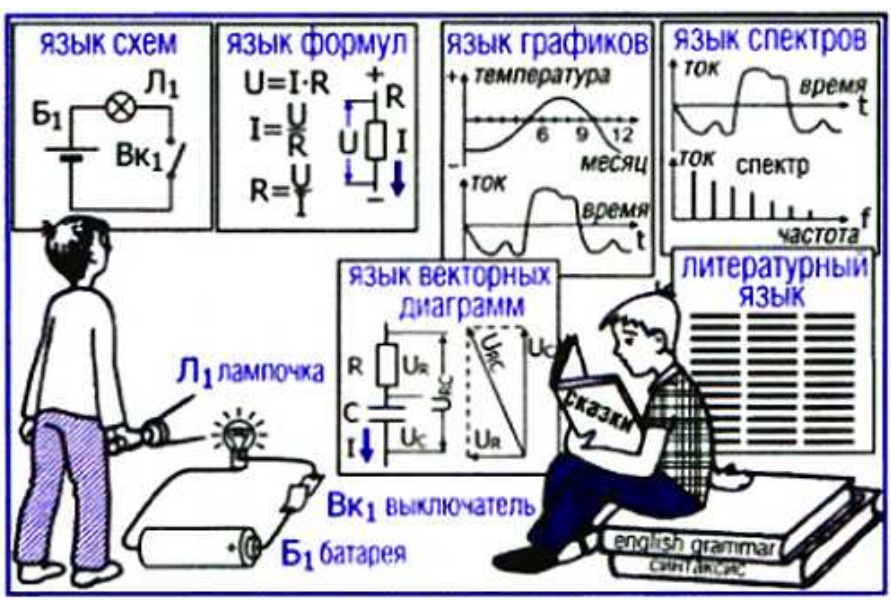
ВК-2. *Эту книгу в каком-то смысле можно назвать многоэтажной, в ней, по сути дела, три рассказа об электричестве, связанных и в то же время самостоятельных. Самый доступный, видимо, это «Весёлый конспект» (ВК), который вы сейчас смотрите. Следующий этаж — основной книжный текст, в котором 21 глава и 240 разделов* ***Т****, чаще всего объёмом 0,5–3 страницы каждый. Их дополняют рисунки* ***Р*** *со сравнительно подробными, как говорят редакторы, с расширенными подрисуночными подписями.*

В разделы Т входят рисунки, они обозначаются буквой «Р» и имеют свою собственную нумерацию, тоже сквозную, от начала книги до конца. На рисунке может быть несколько фрагментов с отдельными номерами, на них даётся ссылка в тексте подробной подписи к рисунку, а иногда и в основном тексте книги. Так,

например, ссылка Р-18.2 означает «Второй рисунок-фрагмент на рисунке Р-18».

На рисунках помещены и формулы — как основные, так и расчётные, вспомогательные. Ссылка на формулу выглядит точно так же, как и ссылка на фрагмент рисунка. В формуле обозначение в скобках возле той или иной величины говорит о том, в каких единицах она в данном случае должна быть выражена. Заметьте: чтобы не пугать читателя, из основного текста почти все формулы перенесены на рисунки, так что текст можно читать спокойно, не прерываясь, а к формулам обращаться, когда захочется или когда это понадобится.

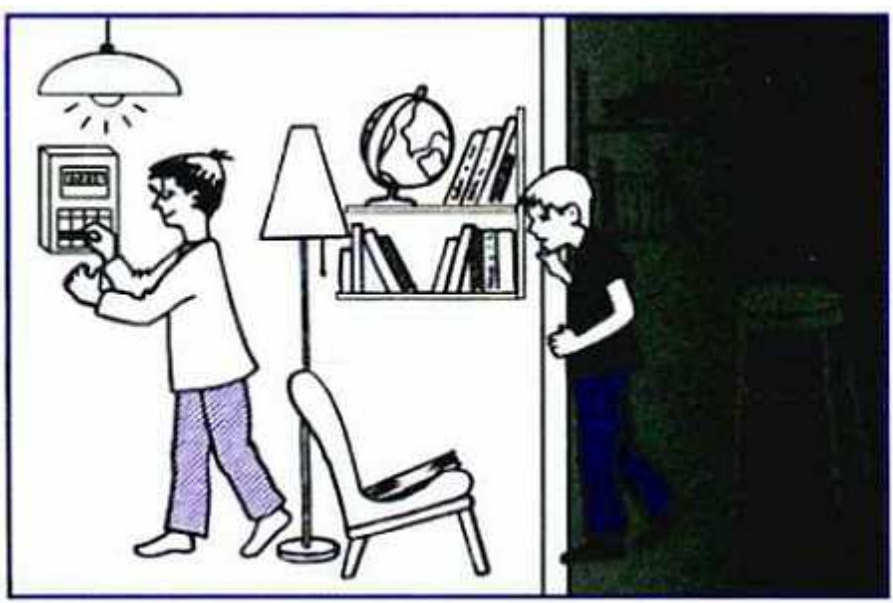
Чтобы помочь читателю при разборе рисунков, обозначенных буквой «Р», кроме обычных подробных подписей к ним на самих рисунках, в своего рода голубых рамках произвольной формы помещены пояснения к некоторым особо важным процессам и деталям. Рисунки Р подобраны и скомпонованы так, что они как бы образуют самостоятельную сюжетную линию книги, это своего рода сжатый конспект основного текста — просматривая эти рисунки, можно освежить в памяти уже прочитанные разделы. К сожалению, рисунки не удалось расположить так, чтобы они всегда находились в той части текста, который должны пояснять. Но, пользуясь ссылками и подробным оглавлением (в конце книги) разделов текста Т и рисунков Р, можно быстро находить рисунки Р, помогающие чтению основного текста, или, наоборот, просматривая эти рисунки, находить связанные с ними разделы текста.



ВК-3. *Книга написана на нескольких разных языках: на привычном русском языке, на языке схем, на языке графиков, на языке простейших математических формул и других. Каждый из них по-своему рассказывает о важных и не всегда простых электрических процессах и объектах. Языки эти развиваются уже много лет и достигли высокого совершенства, в книге, разумеется, представлены простейшие их фрагменты. Понять хотя бы в общих чертах эти языки — значит сделать самый важный шаг в знакомстве с электричеством.*

ВК-4. *Одна из самых известных профессий электричества — оно создаёт свет, освещает наши жилища и улицы городов. Рядовая электрическая лампочка накаливания вот уже более ста лет выпускается и всё ещё продаётся, несмотря на низкий коэффициент полезного действия (к.п.д., иногда пишут КПД). Лампочка, видимо, прельщает своей простотой и надёжностью, но бывает, что в ней происходит короткое замыкание цепи обрывками сгоревшей нити.*

ВК-5. *Так бывает нечасто, но всё же бывает: в вашей квартире неожиданно гаснет свет. Конечно, на этот случай надо бы иметь фонарик, получающий электричество от батарей, и самое главное, нужно знать, где его искать. Но и без него человек, знакомый с тем, как электричество вводится в квартиру, сумеет быстро определить, в какой комнате произошло короткое замыкание, заставившее сработать автоматы-выключатели.*



ВК-6. *Пользоваться электрическими приборами и аппаратами широкого потребления (светильники, кофеварки, приёмники, телевизоры и др.) совсем просто, и для этого, вроде бы, не нужны какие-то знания о самом предмете — об электричестве. Однако многие люди, даже если их профессия напрямую не связана с электричеством, стараются понять, что представляет собой это скрытое от нас чудо природы и как можно наладить с ним хотя бы самые простые деловые отношения.*

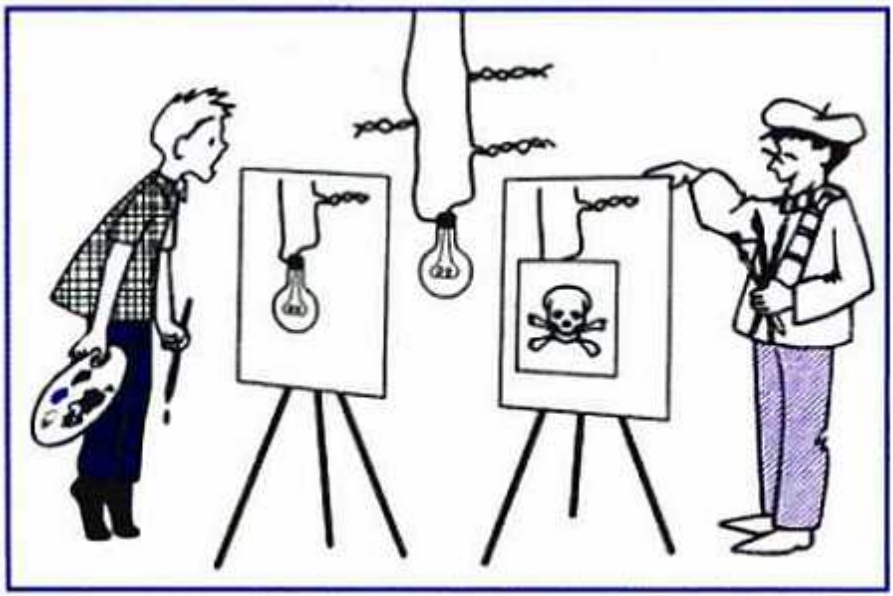
Работая над книгой, автор, как правило, прежде всего думает о том, кто её будет читать, строит, как принято говорить, модель читателя. В данном случае получилось несколько разных моделей, и автор пытался приспособить книгу для каждой из них. Тот, кто будет пользоваться книгой как учебником для самообразования, найдёт в основном тексте (разделы Т) последовательное изложение основ электротехники, по структуре оно близко к серьёзным учебникам. Этим разделам помогают основные рисунки (Р) со своими довольно подробными подписями, они делают каждый рисунок Р в значительной мере независимым рассказом, с которым можно познакомиться отдельно.

А ещё есть в книге около трёхсот особых рисунков (их можно назвать юмористическими) тоже с подробными подписями, все вместе они образуют своего рода весёлый конспект основного текста. Этот распределённый по всей книге самостоятельный раздел так и называется: «Весёлый конспект», он сокращённо обозначается ВК, и его рисунки также имеют свою нумерацию. Рисунки ВК помогают понять некоторые непростые электрические и магнитные явления, работу электрических машин, они будут полезны прежде всего тем, кому страшновато браться за сложное дело. Герои «Весёлого конспекта», как могут, стараются показать, что страшного ничего нет, что во всем можно разобраться и что не нужно бояться науки об электричестве.

И действительно — не нужно бояться.

Т-6. **Читатель может в различной последовательности знакомиться с разделами книги.** Лучше всего, конечно, действовать старым способом — начать книгу с начала и, последовательно продвигаясь, пройти её до конца. Но может случиться, что читатель не дотерпит до окончания «основного курса» и начнёт знакомиться с материалами, которые как-то связаны с реальными электрическими машинами и аппаратами. Или, предполагая трудности с освоением теории, начнёт с более лёгких иллюстративных материалов, например с рисунков Р. Или начнёт с того, что пройдёт с начала до конца весь «Весёлый

конспект» (ВК) с его достаточно подробными поясняющими текстами. Все эти варианты вполне допустимы, как, впрочем, и любые другие, — был бы результат.



ВК-7. *Электричество при определённых условиях может травмировать живой организм, изменить ход биохимических процессов, нарушить нормальную работу отдельных органов. Беспечное отношение к электричеству, незнание правил безопасности при работе с ним может привести к трагическим последствиям. Достаточно вспомнить, что ток всего в 50 миллиампер, попавший в область сердца, сбивает ритм сигналов, определяющих его работу, и через несколько секунд может привести к полной остановке сердца.*

Т-7. **Книга написана на нескольких разных языках, освоить их — значит сделать самый важный шаг в изучении электричества.** Беседуя с друзьями, читая книгу или слушая радио, мы пользуемся обычным нашим разговорным языком и даже не думаем, какую огромную роль сыграл он в человеческой истории, как объединил людей для совместного труда, для борьбы со стихиями. Более того, придумав разговорный язык как средство связи, средство общения, человек стал мыслить словами, создавать на их основе общие понятия, оперировать ими, размышлять — стал человеком разумным. Если бы не язык, то мы с вами сейчас, скорее всего, прыгали бы с ветки на ветку где-нибудь в джунглях Экваториальной Африки.

Внимательно наблюдая за самим собой, нетрудно убедиться, что мы в основном мыслим словами. Стоит вам подумать: «Я иду в школу», — и где-то в глубине слышатся слова: «Я и-ду в шко-лу». Английский мальчик о том же самом подумает так: «Ай гоу ту тзэ скул»; немецкий мальчик: «Их гее ин ди шуле»; вьетнамский: «Той ди хап».

Каждый человек думает словами, думает на том языке, на котором говорит. И не случайно преподаватели иностранных языков считают, что вы только тогда по-настоящему изучили язык, когда начали мыслить на нём так же, как и на своём родном. А физиологи установили, что человек решает житейские задачи, просто недоступные животным, и решает их только потому, что у него, у человека, есть разговорный язык, на котором он мыслит.

ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО ?
Электричество–это такая штука, которая, когда включаешь выключатель, оно переходит из проводов в лампочку и делает свет.
Электричество–это совокупность явлений, в которых обнаруживается существование, движение и взаимодействие частиц, имеющих электрические свойства.

ВК-8. *Мы вначале признаём электричество как нечто реальное, когда оно начинает действовать, например, нагревает нить лампочки и заставляет её светиться или приводит в движение электропоезда. В этих примерах начинают действовать особые электрические силы, которые, как мы увидим, есть в каждом атоме, но часто себя не показывают. Следующий рисунок ВК напомнит о школьных опытах, заставивших действовать эти электрические силы.*

Итак, человек мыслит словами. Но вот шахматист, автоматически сделав несколько первых ходов, задумывается над

сложной позицией. Неужели же и он в это время слышит слова: «Если я на-па-ду ко-нём на его сло-на, то он пой-дёт на по-ле цэ-че-ты-ре и, заб-рав мо-ю пеш-ку, по-па-дёт под у-дар мое-го фер-зя и тог-да…»?

Нет, конечно же, шахматист не думает звучащими словами разговорного языка. Он думает совсем на другом языке, на специфическом языке шахмат, оперирует в своём сознании готовыми образами фигур, без всяких слов двигает в уме эти фигуры с одной клетки на другую, думает на языке, где вместо слов — фигуры, позиции, ходы, комбинации. Точно так же, как механик, всматриваясь в сложную машину, мыслит на своём языке, «слова» которого — это образы конкретных деталей, их типичные взаимодействия, скажем, зацепление шестерён или сжатие пружины. И математик, читая свои математические тексты, тоже в основном обходится без разговорного языка, мыслит математическими символами и действиями, а композитор — мелодиями, аккордами, ритмами.

Нас окружает огромный мир, мир вещей и явлений. И наша вычислительная машина, наш мозг, по мере того как мы познаём этот мир, строит его модель, его упрощённое описание. Оно состоит из записанных; в памяти слов, картин, элементов их взаимосвязи.

Самое универсальное средство для описания мира, для построения его модели — наш разговорный язык. На нём можно и о жизни поговорить, и историю вспомнить, и о достижениях медицины рассказать, а если постараться, то и математическую формулу пояснить. Но для некоторых областей, таких как устройство машин, шахматы, музыка, электрические аппараты, химические соединения, существуют специальные языки, более удобные, более экономные и оперативные.

ВК-9. *Каждый человек сталкивался с электричеством, пользовался им или даже изучал профессионально. Однако далеко не каждый возьмётся рассказать, что это такое, электричество. А вместе с тем это одна из важнейших важностей нашего мира, столь же важная, скажем, как гравитация. К ней мы привыкли, считаем её естественной и понятной, но на вопросы «что это такое?» и «откуда оно взялось?» можем лишь ответить: так устроен мир, в котором мы живём. Так же пока приходится отвечать на вопросы о природе электрических сил.*

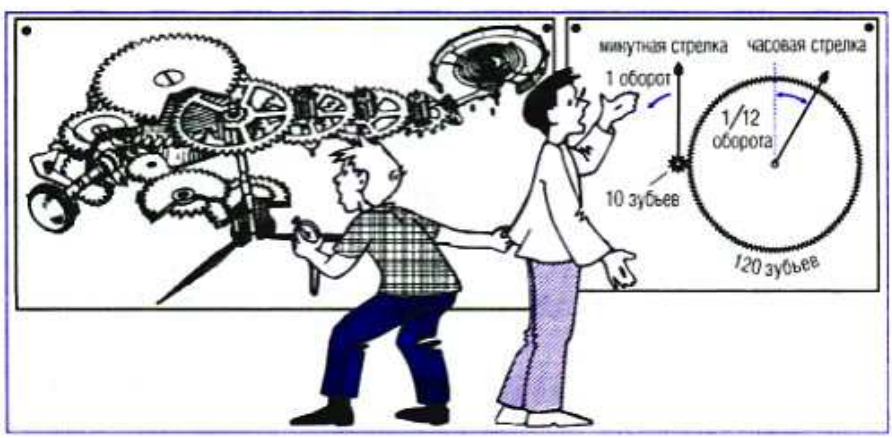
Здесь может быть уместно такое сравнение: универсальный автомобиль для перевозки грузов — это грузовик с откидными бортами, на нём можно перевозить всё. Но для перевозки песка удобнее самосвал, для перевозки людей — автобус, для перевозки молока — автоцистерна. Мы пользуемся универсальным языком звучащих слов или осваиваем новые языки в зависимости от того, какую задачу нужно решить, что нужно описать — простую житейскую ситуацию «Я иду в школу», устройство машины или состав вещества. В первом случае удобен разговорный язык, во втором — язык чертежа, в третьем — язык химических формул.

Чтобы познакомиться с работающим электричеством, обязательно нужно освоить несколько новых языков. Чаще всего мы будем пользоваться языком электрических схем, которые с помощью условных обозначений могут детально описать самые разные электрические аппараты — от карманного фонарика до большой вычислительной машины. Освоив этот язык, вы будете

легко и свободно манипулировать в уме электрическими схемами, не только понимая, но просто-таки чувствуя, что происходит в реальной электрической цепи.

Мы освоим также великолепный язык графиков, с его помощью удобнее всего рассказать о процессах, которые происходят в электрической системе. Очень удобен и язык простейших математических формул, он, в частности, помогает экономно и наглядно представить законы электрических цепей, показывает, от чего зависит та или иная характеристика и каким образом. Есть ещё язык спектров и язык векторных диаграмм, эти языки тоже окажут нам серьёзную помощь.

Вы сможете спокойно, без страха встретиться с любой незнакомой электрической техникой, если будете знать названные выше специальные языки, пусть не в очень большом объёме, но знать хорошо, мыслить на них. Освоение этих языков — задача не очень сложная, мы будем постепенно, шаг за шагом, решать её, всякий раз чувствуя себя увереннее и свободнее в электрическом мире.



ВК-10. *Многое в этой книге излагается упрощённо, очень упрощённо и, возможно, даже слишком упрощённо. Делается это для того, чтобы читателю легче было получить представление о существе дела, об основных объектах, процессах и законах невидимого электрического мира. Иногда за этим первым упрощённым описанием следуют в основном тексте или на рисунках некоторые важные и более сложные подробности. Но, конечно, полную информацию нужно искать в серьёзных учебниках.*

Т-8. **Многое в книге излагается упрощённо, а кое-что очень упрощённо и, может быть, даже слишком упрощённо.** Известный астрофизик Иосиф Самойлович Шкловский,

рассказывая о своей работе, заметил, что ему, наверное, никогда не удалось бы успешно развивать свою науку, если бы он постоянно думал о чудовищных космических расстояниях или гигантских интервалах времени, которыми измеряются космические события. Работая, он думал совсем иными масштабами, оперировал образами, крайне упрощёнными, но зато удобными, такими, которые легко себе представить. Ну, скажем, Солнце он представлял себе как некий шар размером поменьше футбольного мяча. А иногда и нашу Галактику считал однородным телом, приравнивал её к своего рода плоскому Солнцу, хотя в Галактике десятки миллиардов похожих на него звёзд, а сама она в тысячи миллиардов раз больше Солнца. Чтобы почувствовать масштабы всех этих упрощений, напомним, что Солнце — это огненный шар диаметром 1,5 миллиона километров, что примерно в 120 раз больше, чем диаметр нашей планеты.

В нашем рассказе об электричестве очень часто будут встречаться подобные упрощения истинной картины: изменение масштабов, использование образов искажённых, но более удобных для обдумывания.

Мы будем, например, представлять себе атомные ядра и даже сами атомы маленькими шариками, этакими горошинами, песчинками или мельчайшими крупинками соли. А ведь всё это сложнейшие системы, собранные из множества разнообразных деталей, размеры которых невообразимо малы — в миллионы и миллиарды раз меньше той же пляжной песчинки.

Мы будем часто пользоваться простыми аналогиями, сравнивая, например, электромагнитные процессы с механическими: переменный ток с качелями или накопление электрических зарядов в конденсаторе с наполнением ведра водой. В то же время сходство между этими процессами чисто внешнее, их физическая сущность совершенно разная.

Мы, наконец, будем пользоваться привычными, житейскими словами, чтобы рассказать о сложных электрических или магнитных явлениях, будем, например, употреблять такие выражения, как «электроны быстро побежали», или «магнитное поле старается помешать нарастанию тока», или даже «атомное ядро не хочет отпускать электроны». Подобные выражения в книге встречаются настолько часто, что пришлось отказаться от традиционных кавычек, иначе страницы были бы просто переполнены этим типографским знаком. Иногда, чтобы привлечь ваше внимание, в основном тексте будет напоминание (Т-8) об этом важном разделе предисловия.

Все упрощения и искажения в книге делаются только для

того, чтобы можно было думать о вещах сложных и непривычных, пользуясь знакомыми и понятными словами, образами, сравнениями. Чтобы облегчить познание нового, опираясь на то, что уже известно. Встречаясь в тексте с грубыми механическими моделями электрических схем, с сильно упрощённым описанием структур или процессов, с разного рода прыжками электронов или стараниями магнитных полей, нужно помнить, что всё это, так сказать, военная хитрость, необходимая для штурма крепостей непонятного. И что упрощённое описание какой-либо физической сложности — это не более чем упрощённое описание.

Т-9. **Автор должен предупредить, что книга имеет серьёзный недостаток, его нельзя было избежать, но в будущем, надеюсь, удастся исправить.** Уже с самых первых набросков плана книги автору стало ясно, что в ней не удастся рассказать об электричестве всё, что хотелось бы. Электричество с давних пор имеет, образно говоря, две основные профессии — оно работает в энергетике и в информатике. Сегодня применение электричества в информатике превратилось в гигантскую область науки, техники, технологии, эту область обычно называют радиоэлектроника, или просто электроника, она объединяет радиосвязь, радиовещание, телевидение, электронную автоматику, вычислительную технику, медицинскую электронику, радиолокацию, робототехнику и много других уже давно самостоятельных научных и технологических направлений.

Чтобы не переходить на скороговорку и не превысить разумный объём книги, для неё была выбрана традиционная структура учебников электротехники: в книге рассказывается об электрических цепях постоянного и переменного тока и об использовании электричества в энергетике. О применении электричества в информатике в таких учебниках, как правило, рассказывают очень скупо, а случается, вообще не вспоминают. И в этой книге электронике отдано сравнительно немного места (одна глава из двадцати), и тема эта введена главным образом для того, чтобы напомнить о её существовании. Электричество в информатике — это настолько большая и многообразная сфера, что даже не очень детальный рассказ о ней потребовал бы отдельной книги побольше этой. Автор надеется в обозримом будущем подготовить такую книгу, завершив тем самым начатый рассказ об электричестве.

Здесь, пожалуй, уместно признаться, что и эта книга, и планируемая следующая берут своё начало из одного источника — из учебной книги для радиолюбителя «Электроника шаг за шагом». Некоторые её разделы (приёмники, усилители, высококачественное воспроизведение звука, транзисторные

схемы) отдельными изданиями начали выходить еще в 1959 году, в полном объёме книга впервые вышла в 1979 году и затем с дополнениями и изменениями ещё три раза переиздавалась, последний раз в 2001 году. За прошедшие годы электроника, конечно, стала неузнаваемой, но основные, учебные разделы книги вряд ли нужно считать устаревшими — электрический ток, как и сто лет назад, мы измеряем в амперах, а устройство атома упрощённо рассматриваем в веде некоторого подобия Солнечной системы.

Т-10. **Читатель получает последнее и при этом самое важное предупреждение.** Независимо от того, какую вы выберете последовательность знакомства с книгой, вам просто необходимо в числе первых познакомиться с разделом Т-195. Он посвящён некоторым воздействиям электричества на человеческий организм и содержит несколько чрезвычайно важных правил.

Когда имеешь дело с электричеством — шутки в сторону, даже безобидный обычно электрический аппарат может стать источником серьёзной травмы. Да что там травма — может привести к гибели человека. Ежегодно при взаимодействии с электричеством в мире гибнет почти 20 тысяч человек — страшная цифра. И, как правило, люди гибнут по-глупому: по неосторожности, по неграмотности или из-за неуместной удали. В большинстве случаев несчастья могло бы не быть, если бы соблюдались очень простые правила — правила техники безопасности.

Познакомьтесь с этими правилами, вникните в их суть, запомните их и неукоснительно соблюдайте — здесь лучше перестараться, чем недосмотреть.

На этом позвольте закончить наше несколько затянувшееся предисловие. Всё, что хотелось в нём сказать, сказано, все предупреждения сделаны, и можно отправляться в путь.

Глава 2
Где живёт и как действует янтарная сила

Многие читатели решили познакомиться с электричеством, имея среди прочих желание получить какие-то практически полезные сведения. Может быть, даже научиться ремонтировать утюг или заряжать автомобильный аккумулятор. Но в электротехнике любые практические навыки ты набираешь спокойней, уверенней, если понимаешь суть дела, понимаешь его основы и истоки, иногда, казалось бы, совсем далекие от практики. Полезно, например, задуматься о том, почему греется розетка, в которую включён телевизор, и почему щёлкает выключатель при включении и выключении света. Или задуматься о том, что Вселенная родилась миллиарды лет назад в результате Большого взрыва, от которого наш мир получил нечто такое, что мы сейчас называем электричеством.

Т-11. **Каждый человек встречался с электричеством, но далеко не каждый решится объяснить, что это такое.** Вопрос «Что такое электричество?», как правило, вызывает затруднение не только у тех, кто всего лишь пользуется электрочайником или ездит на электричке. Даже в учебных книгах обычно уходят от этого вопроса, либо в открытую, скажем, так: «Ответить на этот вопрос пока еще нельзя», либо закрываясь не очень понятными фразами типа: «Электричество — одна из форм движения материи» или «Электричество — совокупность явлений, в которых проявляются электрические заряды». После этого последнего сообщения первоначальный непростой вопрос автоматически превращается в не менее сложный: «Что такое электрический заряд?» — и, как говорится, опять проклятая неизвестность.

Конечно, электричеству нельзя дать простое объяснение такого, например, типа: «Электричество — это синего цвета жидкость с запахом керосина и вкусом огуречного рассола». Но к какой категории понятий относится электричество, где его место в нашей картине мира, на что оно похоже, как обнаруживается, на какие порции делится, почему может быть полезным — обо всём этом можно сказать и обязательно будет сказано. Но чуть позже.

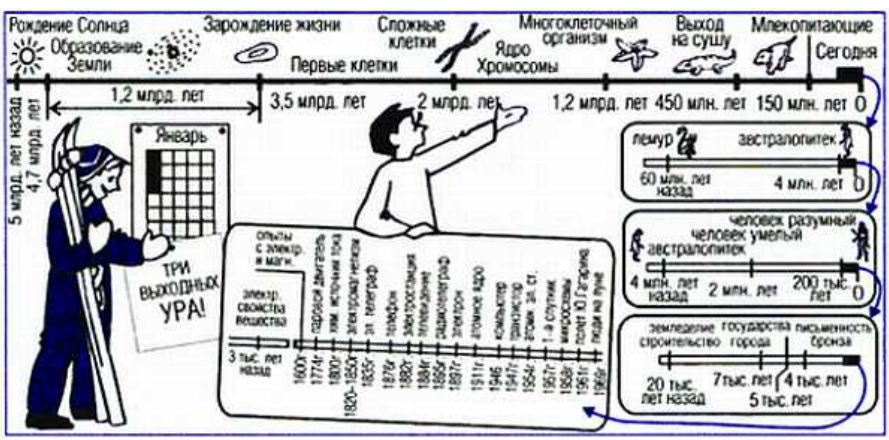
Т-12. **Мир, в котором мы живём, устроен намного**

сложней, чем кажется с первого взгляда. Если раздобыть где-нибудь машину времени, проехаться на ней в далёкое прошлое и побеседовать с тамошним жителем, то он нарисует вам картину мира довольно-таки простую. В ней будет плывущий над нами потолок-небосвод, на котором закреплены звёзды, будет небольшой раскалённый шар, который каждый день перекатывается по небосводу от одного его края до другого, будет трение, рождающее огонь, и холод, превращающий воду в лёд. И ещё будут некоторые твёрдо установленные истины, по нынешней терминологии, законы природы. Например, такие: «Дерево, пожираемое огнём, даёт тепло», «В воде дерево не тонет, а камень тонет», «Всякое тело стремится к земле, тянется к ней по своей собственной воле».

Не торопитесь, пожалуйста, выводить своему далёкому предку двойку по природоведению. Таким же, наверное, виделось бы окружающее любому из нас, если бы он вырос где-нибудь на необитаемом острове без квартиры с водопроводом и паровым отоплением, без магазинов «Гастроном» и без школьных учебников, которые вобрали в себя тысячелетия исследований природы и размышлений. Так что запас знаний человека древнего необученного был для того времени не таким уж скудным, у него, единственного из всех земных обитателей, была своя картина мира.

И всё-таки…

И всё-таки это была картина мира, созданная всего лишь первобытным собирателем плодов, охотником, имевшим в своём арсенале палку и камень. Эту картину, конечно же, не сравнишь с тем, что знает современный человек, пассажир реактивного лайнера, владелец сотового телефона, ровесник электрического изобилия и лунных экспедиций.



ВК-11. *Возраст нашей Вселенной примерно 13 миллиардов лет, Солнца — около 5 миллиардов и планеты Земля — 4,8 миллиарда лет. Земля довольно долго остывала и бурно формировала свою поверхность. А примерно 3,5 миллиарда лет назад на ней возникли первые живые клетки, и после 2,5 миллиарда лет их эволюции стали появляться простейшие животные. История человека разумного — примерно 200 тысяч лет, а широко использовать электричество люди научились вообще каких-то 200 лет назад.*

Р-1. ВОТ ОНО, ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, — УБЕДИТЕСЬ САМИ! Для этих опытов мы выбрали два вполне доступных и широко известных материала — оконное стекло и пластмассу, из которой делают гребёнки или корпуса дешёвых шариковых ручек. В обычном своём состоянии стеклянная и пластмассовая палочки никаких особых свойств не имеют (**1**), и об этих материалах мы пока можем говорить лишь то, что известно человеку уже много лет, к чему он привык: о массе стекла и пластика, о их форме, размерах, цвете, твёрдости и т. п. Но вот мы натёрли стеклянную и пластмассовую палочки обычной тканью (**2**), и у них появилось какое-то совершенно новое свойство — у палочек как бы появилась новая сила, которая притягивает лёгкие клочки бумаги. Эта сила преодолевает силу тяжести клочков бумаги (пусть немного, но бумага что-то весит!) — в соответствии с известными законами природы кусочкам бумаги следовало бы падать вниз, а они поднимаются вверх, движутся к натёртым стеклянной и пластмассовой палочкам. Эту силу мы теперь называем «электричество»,

от греческого слова «электрон», что в переводе означает «янтарь»: почти четыре тысячи лет назад, а может быть, и раньше, загадочные электрические силы были обнаружены при натирании янтаря. Силы эти начинают действовать потому, что в натёртых стекле и пластмассе появляются скрытые ранее особые электрические свойства, или иначе — электрический заряд.

Для подготовки к очень важной второй части нашего опыта отметим, что электрические свойства (электрический заряд) с натёртой стеклянной палочки или с натёртой пластмассовой палочки можно простым касанием частично передать другому предмету, например подвешенному на нитке пенопластовому шарику (**3**)

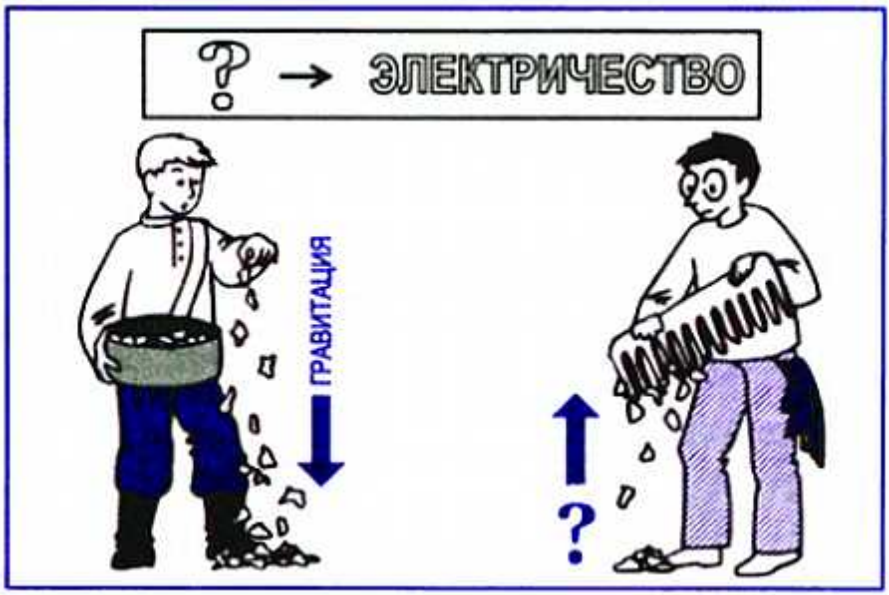
***Т-13*. История человека и человечества в семи абзацах**. Историю человечества можно отсчитывать от разных событий, в том числе и от Большого взрыва, в результате которого появилась наша Вселенная. Совершенно непонятно, что было до этого, и не очень понятно, что происходило сразу после Взрыва, хотя некоторые следы последующих событий сохранились до наших дней. Первое время Вселенная, скорее всего, представляла собой гигантское и быстро расширяющееся облако атомных частиц, затем простейших атомов — водорода и получающихся из них чуть более сложных атомов гелия. Через какое-то время в этом газовом облаке стали возникать сгустки, из которых в итоге получались звёзды. Менялось и само вещество Вселенной, в звёздных процессах стали появляться всё более сложные атомы — сегодня их уже около 100 разновидностей. А звёзд в нашей Вселенной сейчас, по грубым, разумеется, расчётам, чуть ли не триллион триллионов — это число, у которого после единицы 24 нуля.

Сначала только у одной из всех известных звёзд — у нашего Солнца — были надёжно обнаружены вращающиеся вокруг этой звезды большие космические тела — планеты. Планета — удобное место для возникновения жизни, и на одной из планет Солнечной системы — на той, которую мы сейчас называем Земля, — жизнь действительно возникла. Сначала появились простейшие одноклеточные организмы, потом, спустя примерно 2 миллиарда лет, многоклеточные, всё более сложные, разделившиеся в какой-то момент на мир растений и мир животных.

Биологическая эволюция — процесс медленный и долгий, и

лишь через 4 миллиарда лет после образования первых жизнеподобных структур появилось наиболее совершенное творение живой природы — человек разумный. Он выделился из мира животных благодаря тому, что умел ловко работать, придумал замечательное средство общения — разговорный язык, и, главное, благодаря умению мыслить, соображать, что к чему.

Научившись думать, человек, естественно, прежде всего подумал, как улучшить, облегчить свою нелёгкую жизнь. Размышляя об этом, он всматривался в окружающий мир, давал названия предметам и явлениям, образно говоря, наклеивал на них этикетки со словами-названиями. Так со временем появились слова, о значении которых мы уже и не задумываемся, такие, скажем, как «пространство», «время», «вес», «движение», «масса», «сила», «температура». Все эти слова — всего лишь названия того, что мы получили вместе с миром, в котором живём.



ВК-12. *Человек не воспринимает электричество, не чувствует его, как, например, тепло и холод, шероховатость, влажность или вес. Убедиться в том, что электричество существует, можно в простейшем эксперименте: натрите тряпкой пластмассовый предмет, например расчёску, и она начнёт притягивать клочки бумаги. Они должны падать вниз, но какие-то новые свойства натёртой расчёски заставляют бумажки двигаться вверх. Эти долго скрытые от людей свойства были в своё время названы электричеством.*

1
2
пенопласт
стекло
пластмасса
Электрические заряды натёртого стекла и натертой пластмассы чем-то отличаются, если бы они были одинаковыми то и все пенопластовые шарики вели бы себя одинаково. Разные электрические заряды назвали положительными (+) и отрицательными (-)

Р-2. ДВА ОДИНАКОВЫХ, НО В ЧЁМ-ТО РАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА. Натирая тканью стекло и пластмассу, можно выявить скрытые в них до этого особые электрические свойства (заряды), которые туг же начнут действовать — одинаково хорошо притягивать мелкие клочки бумаги. Из этих опытов можно сделать вывод: при натирании стекла и пластмассы в них появляются совершенно одинаковые электрические заряды.

Во второй части опыта мы на всякий случай проверим этот очевидный факт, для чего используем несложную установку — доску, к которой подвешены четыре пары совершенно одинаковых пенопластовых шариков (**1**). Имея две наэлектризованные натиранием палочки, мы передадим этим четырём парам пенопластовых шариков четыре возможные комбинации двух электрических зарядов — с натёртого стекла и с натёртой пластмассы. И самостоятельно придём к выводу, сделанному почти 300 лет назад: электрический заряд бывает двух разных сортов, один из них появился на натёртом стекле, другой — на натёртой пластмассе. Если бы эти заряды были одинаковыми, то пары пенопластовых шариков во всех случаях вели бы себя одинаково.

Две разновидности электрического заряда были названы положительным (появляется при натирании стекла, обозначение «+») и отрицательным (появляется при натирании пластмассы, обозначение «—»). Вывод из этого нашего эксперимента можно сделать очень простой: предметы с одноимёнными электрическими зарядами («плюс» и «плюс» или «минус» и «минус»)

отталкивают друг друга (**1**, **2**), а предметы с разноимёнными зарядами («плюс» и «минус» или «минус» и «плюс») притягивают друг друга (**3**, **4**).

История человечества, начиная с самых первых его шагов, это в значительной мере история изучения мира, история открытий и изобретений. Главная движущая сила — природные инстинкты, навеки записанные в наследственную память, их называют безусловными рефлексами. В числе этих безусловных рефлексов есть такие, которые управляют жизненно важными процессами: дыханием, пищеварением, работой сердца, мышц, системой равновесия и движения. К безусловным рефлексам относится и исследовательский инстинкт, он помогает человеку выжить и передать эстафету следующему поколению. Заметив, что при ударе камнем о камень появляются искры, человек придумал, как добывать огонь и, сжигая дрова, согреваться в зимнюю непогоду, освещать жилище, употреблять варёную пищу, огнём отгонять хищников. Присмотревшись к падающему с уступа ручью, человек придумал водяную мельницу, заставил работать силу земного притяжения. Изучая поведение водяного пара, он в итоге создал паровую машину, мощнейший заменитель своих мускулов. Поднявшись на исключительно высокий уровень исследований и экспериментов, человек открыл навсегда, казалось бы, скрытый от него источник энергии — ядерные силы. Невозможно без волнения думать о том, как изменил жизнь вечно голодного и замерзающего пещерного жителя его исследовательский инстинкт — его природная пытливость, потребность изучать и изобретать.

Как учит энциклопедический словарь, история — это процесс развития общества, развития отношений между людьми, между государствами, партиями, нациями. Мировая история сплетена из сложных и очень разных процессов и событий, таких, как освоение новых территорий, новых торговых путей, накопление богатств, жестокие войны, благородные поступки, обман и предательство, противодействие стихиям. Скорее всего, выявленный физиологами безусловный рефлекс экономии сил был первопричиной захватнических войн, позволявших разбогатеть, не утруждая себя работой, а также подвёл какого-нибудь пещерного штурмбанфюрера к идее рабского труда. Но, видимо, этот же рефлекс экономии сил надоумил наших далёких предков переложить часть тяжёлой работы на волов, лошадей и осликов, а позже научил человека придумывать машины, помогающие ему работать.

В сложную ткань истории человечества вплетена история

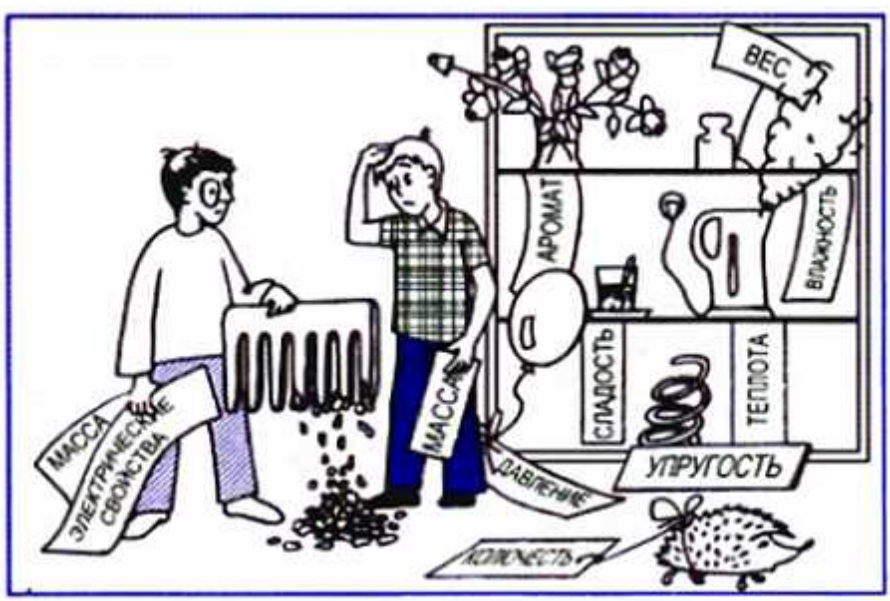
научных открытий и изобретений, которую многие политики считают чем-то второстепенным. Но посмотрите, как изменило мир, как повернуло историю изобретение бензинового двигателя, автомобиля и самолёта, открытие цепной реакции деления урана, за которым вскоре последовали атомная бомба и атомные электростанции. И попробуйте представить себе, каким был бы наш мир, наша история, если бы несколько энтузиастов лет двести назад не взялись за изучение электричества. Вспомните, что успехи разнообразных электрических технологий внесли свой немалый вклад в избавление от рабского труда: сегодня на каждого жителя планеты приходится несколько мускулистых электрических работников, десятки исполнительных электрических секретарей и длинноногих электрических курьеров. А на горизонте истории уже видятся новые победы науки, техники, технологии, в том числе связанные с многообразным применением электричества.

ВК-13. *Электрические свойства натёртой пластмассы (такие же примерно свойства появляются у натёртого тканью стекла, ВК-16) научились оценивать количественно.*

Как, например, в метрах оценивают длину и в килограммах массу. И название у этих свойств теперь строгое и определённое — «электрический заряд». Тот, кто придумал его, видимо, считал, что при натирании в пластмассу или в стекло вталкивают носители электричества, подобно тому, как, заряжая старинную пушку, в неё вталкивали ядро.

Т-14. **Люди не быстро выясняли, как что устроено в природе. Сначала, наверное, лишь одинокие смельчаки решались перейти порог дозволенного и увидеть больше, чем хочет показать природа.** Эти безвестные эдисоны сделали немало великих открытий и изобретений, таких как рычаг, колесо, ориентировка по звёздам, земледелие. И ещё одно великое изобретение — школа, система передачи знаний, умение передавать их потомкам, чтобы те не начинали все «с нуля».

Три-четыре тысячи лет назад размышления о том, как устроен мир, стали своего рода профессией, но ещё очень долго пограничная линия, отделяющая знание от неизвестности, продвигалась вперёд очень трудно и медленно. Лишь где-то с середины прошлого тысячелетия процесс этот заметно ускорился, а к концу тысячелетия пошла просто какая-то лавина открытий и изобретений. Ещё двести лет назад, или, вернее, всего двести лет назад, люди в повозках или на санях мощностью в три лошадиные силы неделями преодолевали расстояние, которое современный самолёт с тремя сотнями пассажиров пролетает за несколько часов. Добавьте к этому радио, телевидение, антибиотики, роботов, цветную фотографию, миллионы автомобилей, синтетические волокна и пластмассы, благоустроенные жилища для миллионов, Интернет, световодную связь, тысячи спутников над планетой. И все это появилось за каких-нибудь сто лет — просто за какое-то мгновение в истории человечества.



ВК-14. *Электрический заряд имеется у многих микрочастиц, из которых состоят практически все вещества нашего мира. С этим зарядом связано появление особых электрических сил, так же как появление гравитационных сил связано с существованием массы. Судя по всему, электрический заряд, как и масса, появился в нашем мире при его рождении, во времена Большого взрыва. Это даёт повод подумать о других основных силах природы. Сколько их всего? И в каких процессах они себя проявляют?*

Т-15. **На сжатой в 30 миллионов раз шкале времени открытие Америки произошло примерно 8 минут назад.** В нескольких популярных книгах о науке встречается интересный приём — авторы сжимают время в 30 миллионов раз, и один год на такой сжатой шкале времени превращается в секунду. Вот как располагаются на ней известные события.

Примерно 500 лет назад (фактически 15 миллиардов лет назад, но мы сжали время в 30 миллионов раз, и из 15 миллиардов лет получилось 500 лет) произошёл Большой взрыв, из загадочной непостижимо плотной микроскопической пылинки родилась и стала быстро расширяться наша Вселенная. Около 150 лет назад в неприметном уголке Вселенной из гигантского газопылевого облака, окружавшего рядовую звезду, которой потом дали имя Солнце, образовалась цепочка планет, и в их числе — наша Земля. Лет двадцать Земля остывала (не забудьте: весь отсчёт времени идёт по сжатой шкале, где год — это 30 миллионов реальных лет), а ещё через десять на некоторых участках её поверхности в тёплых водах Мирового океана начались сложные химические процессы с образованием больших саморазмножающихся молекул, началась предыстория жизни. Около ста лет назад появились первые живые клетки, а затем много десятилетий они совершенствовались, специализировались, объединялись в многоклеточные организмы. Лет десять-двенадцать назад появились рыбы и папоротники, пять лет назад — динозавры, которые, правда, уже через год исчезли с лица Земли. Немногим более четырёх лет назад в небо поднялись первые птицы, примерно через год начали появляться млекопитающие.

И только месяц прошёл с тех пор, как из царства животных выделился человек.

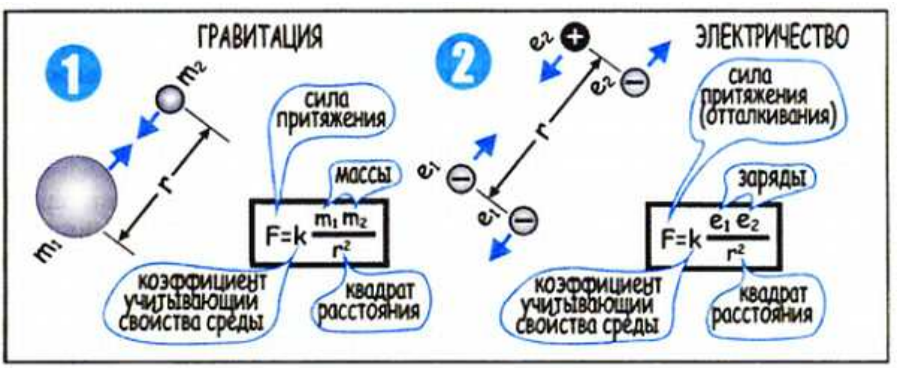
Ещё пару дней назад (мы продолжаем описание событий всё в том же масштабе — год отображаем секундой, тысячелетие при этом сжимается до 15 минут, а 100 тысяч лет превращаются примерно в (утки) наши предки жили в пещерах, учились добывать огонь и пользовались простейшими каменными

инструментами. И лишь два-три часа назад, после многих дней обитания на планете (масштаб все тот же — час отображает примерно 4 тысячи лет) человек сменил каменный топор на металлические орудия, звериные шкуры на тканую одежду, начал строить города, изобрёл письменность. Чуть больше часа назад возникли могучие государства — Греция, Рим, Египет, началось дальнее мореплавание, культурное земледелие, появились философы, астрономы, математики, инженеры, были созданы разнообразные строительные и военные машины, большие корабли, колесницы, водопровод. Менее 10 минут назад Колумб открыл Америку, через 2 минуты после этого заработал паровой насос, ещё через полторы минуты почти одновременно двинулись в путь паровоз и пароход, вслед за ними, меньше, чем через минуту, появилось некоторое подобие электропоезда. Две минуты назад в России отменили крепостное право, полторы минуты назад выехал на дорогу первый автомобиль и почти в то же время взлетел самолёт, заработал телефон, засветились электрические лампочки, появилось кино, родилось радио. Меньше минуты прошло с того момента, как люди научились добывать энергию, спрятанную в атомном ядре, 40 секунд назад первый из землян полетел в космос, ещё через несколько секунд появились персональные компьютеры, а полминуты назад первые люди высадились на Луне.

Большинство открытий и изобретений последнего столетия так или иначе связано с электричеством, хотя его изучение началось с некоторым опозданием. Люди уже умели печатать книги, строить многоэтажные дома, выплавлять металл и отливать пушки, уже были сконструированы пружинные часы и построена паровая машина, а немногочисленные исследователи-энтузиасты всё ещё повторяли и пытались объяснить простейшие опыты с электричеством, впервые описанные более двух тысяч лет назад (это уже обычные, годы — без пересчёта).

Мы с вами, кстати, сейчас обратимся именно к этим опытам — в них проще всего поискать ответ на непростой и в то же время очень простой вопрос: «Что такое электричество?».

ВК-15. *Когда-то считали, что есть пять главных сил: гравитационные, электрические, магнитные, а также действующие только в микромире ядерные сильные и ядерные слабые силы. Однако уже давно доказано, что электричество и магнетизм — это два разных проявления единой электромагнитной силы. А недавно обнаружили новую единую силу, союз трёх — электричества, магнетизма и слабых ядерных сил, — эту тройку назвали электрослабой силой. Теоретики полагают, что со временем может быть обнаружено и «Великое объединение» — единая природа всей пятёрки главных сил.*

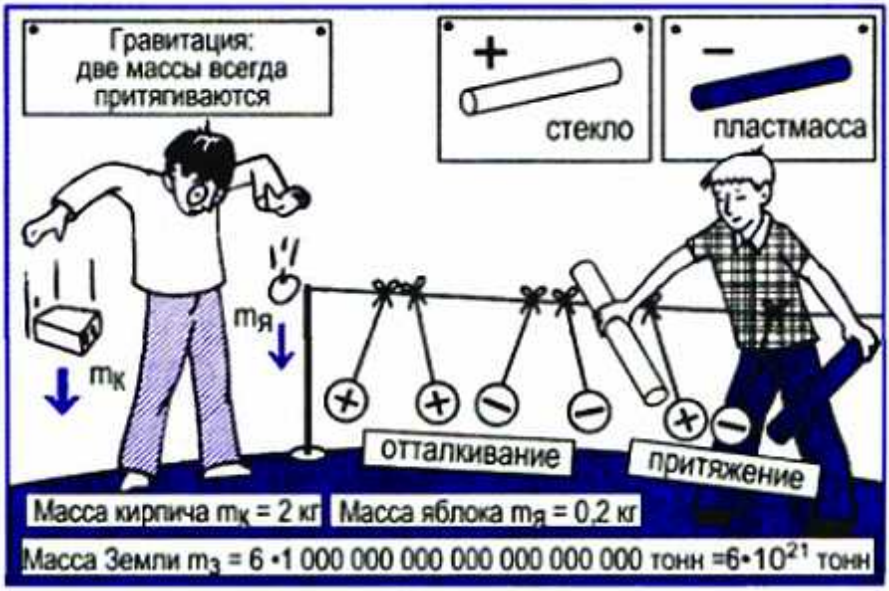


Р-3. СИЛА, РАБОТАЮЩАЯ ВЕЧНО И ЛИШЬ НЕДАВНО ЗАМЕЧЕННАЯ. Любые физические тела, имеющие массу, например $\mathbf{m_1}$ и $\mathbf{m_2}$, притягивают друг

друга (**1**). Этот процесс мы называем гравитацией, а силы $\mathbf{F_1}$, которые пытаются сблизить массы $\mathbf{m_1}$ и $\mathbf{m_2}$, называем гравитационными силами (**1**). Из пятёрки главных сил природы (см. Р-10) гравитация самая слабая. Но мы с вами живём на довольно большой планете Земля с массой 6 000 000 000 000 000 000 000 тонн, а сила гравитационного притяжения тем сильнее, чем больше масса хотя бы одного из участвующих в этом процессе физических тел. Поэтому даже небольшие и лёгкие предметы вроде яблока или дорожной сумки, не говоря уже о мешке с зерном или о гранитной глыбе, притягиваются к огромной массе Земли с вполне заметной силой. Животные, развиваясь и совершенствуясь

Электрические силы (**2**), так же как гравитационные, были получены нашим миром как бы в подарок при его рождении. Электричество играет особо важную роль практически во всём, что было дальше, — от создания устойчивых атомов до появления и развития жизни. Но электрические процессы не столь заметны, не столь доступны, как гравитационные, — скрытое от нашего взгляда электричество приходится изучать для того, чтобы получить доступ к его использованию.

Т-16. **Наряду с бессчётными вопросами, на которые можно ответить детально и конкретно, есть немного «почему?», допускающих пока только один ответ: «Так устроен наш мир».** Вы подняли с земли небольшой камушек, затем отпустили его, и камушек полетел вниз, упал на землю. Почему? Что за странный вопрос? Камушек полетел вниз, потому что Земля его притягивает. А почему она его притягивает? Вы задумались: что ответить? Можно пошутить: «Почему? Потому что кончается на «у». Можно нагрубить: «Притягивает, потому что притягивает». Можно схитрить: «Мы этого ещё не проходили». Но как тут не мудри, как не хитри, а привычного объясняющего ответа вы не найдёте. Камень притягивается к Земле — это факт. И если начать разбираться, то окажется, что падение камня всего лишь частный случай более общего явления: все физические тела, имеющие массу, все предметы притягивают друг друга.



ВК-16. *Гравитация известна одного типа — две массы всегда притягиваются. А вот электрический заряд, оказывается, бывает двух разновидностей — одну назвали положительной (обозначается знаком «плюс», «+»), другую отрицательной (обозначается знаком «минус», «—»). Оба заряда часто действуют одинаково, например, одинаково хорошо притягивают клочки бумаги. А вот друг с другом заряды взаимодействуют по-разному: разноимённые (+ и —) притягиваются, а одноимённые (+ и + или — и —) отталкиваются.*

Явление это назвали «гравитация», от латинского слова «гравитус» — «тяжесть». Часто с тем же смыслом употребляют и русское слово «тяготение» (скорее всего от слова «тяга»), прекрасно отражающее существо дела: все объекты нашего мира тяготеют друг к другу, испытывают, так сказать, взаимное гравитационное влечение. Именно это Ньютон назвал законом всемирного тяготения. Переместитесь со своим камушком на Луну, и он там тоже будет притягиваться к «земле» — будет падать на лунную поверхность. При этом камушек будет одновременно притягиваться и к Земле — тяготение всемирное, каждый притягивается к каждому, все ко всем. Но только от Земли камушек уже далеко, а к лунной поверхности — близко. Сейчас Луна тянет его несравнимо сильней, чем Земля, — гравитационные силы с расстоянием резко уменьшаются, и чем ближе один к другому два каких-нибудь предмета, тем сильнее они притягиваются.

По закону всемирного тяготения даже два яблока, которые лежат на тарелке, притягивают друг друга. Но сила притяжения у них ничтожно малая, её никак не хватает на то, чтобы сдвинуть яблоки с места. Дело в том, что сила гравитационного притяжения зависит не только от расстояния, но и от массы притягивающихся предметов или, проще говоря, от того, насколько много в них вещества, насколько много атомов и молекул.

Масса Земли огромна — примерно 6 триллионов триллионов килограммов, шестерка и за ней 24 нуля. Поэтому там, где в гравитационном взаимодействии участвует Земля, появляется довольно большая сила, её вполне хватает на то, чтобы энергично перемещать к земной поверхности выпущенный из руки камень, капли дождя или даже оторвавшийся от дерева очень лёгкий засохший жёлтый лист. А масса Луны в 80 раз меньше, и она притягивает к себе значительно слабее Земли. Поэтому астронавты так легко ходили (можно даже сказать прыгали) по Луне, и для того чтобы оторваться от неё, космическому аппарату хватило одного сравнительно небольшого двигателя.

Кстати, мы допускаем неточность, когда утверждаем, что камушек притягивается к Земле. Притяжение у них взаимное, но Земля тяжёлая, ей трудно сдвинуться с места, а камушек лёгкий, гравитационные силы перемещают его без особого труда.

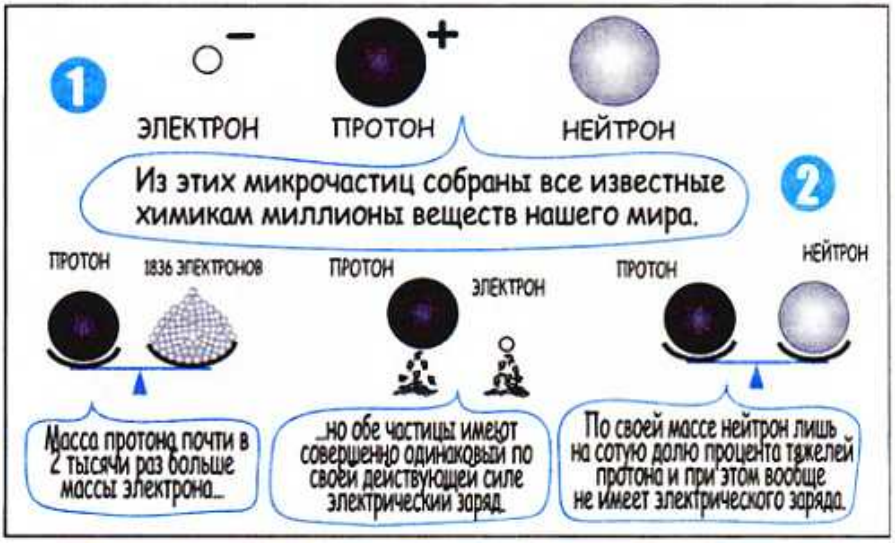
Но, как говорится, к чёрту подробности — мы заговорили о падающем камне для того, чтобы сделать выводы чрезвычайной важности. Опыт демонстрирует нам явление, которое называют гравитационным притяжением или гравитационным взаимодействием, а коротко — просто гравитацией. Откуда она появилась? Какова природа гравитации? Почему разные предметы притягивают друг друга?

Можно написать цепочку химических формул и объяснить, почему горят дрова. Можно нарисовать несколько схем и объяснить, почему взлетает многотонный самолёт. Но сегодня подобным образом нельзя, невозможно достаточно просто объяснить, почему работает гравитация. Мы своими глазами видим, что камень падает на Землю, видим, что гравитационное притяжение есть. И объясняется оно очень просто и понятно: так устроен наш мир.

ВК-17. *Все вещества состоят из атомов, и самый простой из них — атом водорода. В его ядре один протон с положительным электрическим зарядом (+), а вокруг ядра вращается электрон — частица с отрицательным зарядом (—). Электрон под действием центробежных сил «бежит от центра», но убежать не может из-за электрического притяжения к ядру. Так электрические силы обеспечивают устойчивость атомов, вплоть до самых сложных, в ядре которых больше сотни протонов, а на орбитах столько же электронов.*

Т-17. **Электричество — одна из важнейших важностей нашего мира, одна из действующих в нём главных сил.** Все живые организмы знают, что такое гравитация, прекрасно чувствуют её — чувствуют собственный вес или вес предмета, который нужно поднять. А человек не только чувствует гравитационные силы, но уже давно сумел приручить гравитацию, заставил её, например, бесплатно перевозить грузы вниз по реке и вращать жернова водяной мельницы. Коротко говоря, мы с вами полностью свыклись с гравитацией, считаем её совершенно естественным и абсолютно понятным явлением.

ВК-18. *Ночная гроза — хороший повод для размышлений о нашей истории. Такие же молнии полыхали миллиарды лет назад (история учит, какой огромный срок тысяча лет, а тут тысяча тысяч — миллион и тысяча миллионов — миллиард), когда из бессчётных молекул в океане сложилась химическая цепочка их размножения. Через 3 миллиарда лет по джунглям уже бродили стада динозавров. А ещё через 60 миллионов лет заработал первый в мире радиоприёмник, названный грозоотметчиком.*


1
ЭЛЕКТРОН
ПРОТОН
НЕЙТРОН
Из этих микрочастиц собраны все известные химикам миллионы веществ нашего мира.
2
ПРОТОН
1836 ЭЛЕКТРОНОВ
ПРОТОН
ЭЛЕКТРОН
ПРОТОН
НЕЙТРОН
Масса протона почти в 2 тысячи раз больше массы электрона...
...но обе частицы имеют совершенно одинаковый по своей действующей силе электрический заряд.
По своей массе нейтрон лишь на сотую долю процента тяжелей протона и при этом вообще не имеет электрического заряда.

Р-4. ТРИ САМЫЕ ПОПУЛЯРНЫЕ МИКРОЧАСТИЦЫ. Все известные нашим химикам миллионы веществ в итоге сделаны из трёх типов микрочастиц: протонов, нейтронов и электронов. Первые две частицы — протон и нейтрон — своего рода тяжеловесы микромира. Каждая из них в триллион триллионов раз легче песчинки, но в то же время почти в две тысячи раз тяжелее электрона. При этом тяжёлый протон и лёгкий электрон в дополнение к массе имеют ещё и электрический заряд, по своей силе одинаковый, но по знаку разный — у протона «плюс» (электричество этого типа появляется при натирании стекла), у электрона «минус» (а он появляется при натирании пластмассы). Нейтрон по своей массе почти такой же, как и протон, но никакого электрического заряда вообще не имеет — об этом говорит само название частицы, которое происходит от латинского слова «нейтрум» — «ни то ни другое».

Около двух с половиной тысяч лет назад древнегреческий философ и исследователь природы Фалес Милетский сообщил своим коллегам, что у гравитации есть соперник, ранее ловко скрывавшийся от людей. Обнаружилось, что если натереть шерстью янтарную палочку (янтарь — окаменевшая прозрачная смола древних деревьев), то палочка притягивает к себе лёгкие предметы, скажем, клочки ткани. Под действием своего веса, то есть под действием гравитационного притяжения к Земле, эти клочки ткани должны были бы падать, двигаться вниз. А они, преодолевая силы гравитации, упрямо поднимаются вверх.

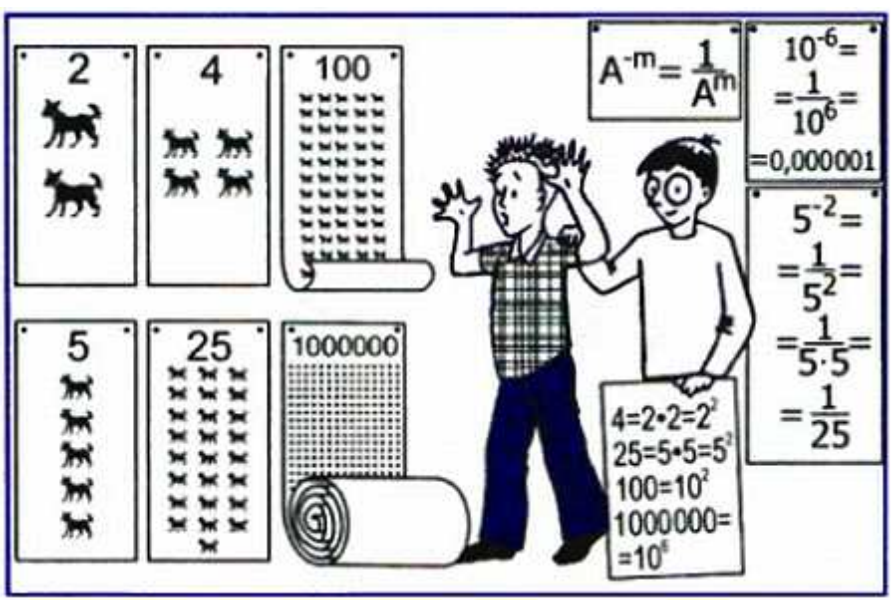
О чём это говорит? Только об одном: кроме гравитационных сил, кроме сил притяжения, которые стремятся сблизить две массы, в мире существуют ещё какие-то силы. И в опыте с натёртой янтарной палочкой они оказались сильнее гравитации. Какова природа этих неизвестных ранее сил? Почему они появляются после натирания янтаря?

Ответить на эти вопросы первые исследователи не могли, они лишь подробно описали, зафиксировали сам факт непонятного притяжения. А название «электричество» новому явлению, судя по всему, было дано лишь через две тысячи лет — оно впервые появилось в трудах Вильяма Джильберта, придворного врача английской королевы. Он, как мы сейчас сказали бы, в свободное от работы время занимался исследованием магнитов, а затем стал повторять опыты греков с электричеством. На русский язык это слово можно было бы перевести так: «янтаричество». Потому

что «электричество» происходит от греческого слова «электрон», что означает «янтарь», и электричеством новое явление было названо именно потому, что оно было обнаружено в опытах с янтарной палочкой.

Опыты с натиранием янтаря позволяют сделать очень важный вывод. До этих опытов было известно только одно основное свойство вещества — масса. Именно она была первопричиной гравитационных взаимодействий, заставляла предметы притягиваться друг к другу, двигаться, работать. Натёртый янтарь показал, что наряду с массой у вещества может быть ещё одно работающее основное свойство, в дальнейшем ему дали название «электрический заряд». Почему электрический — понятно. Почему заряд? Трудно сказать. Может быть, тот, кто впервые ввёл это понятие — «электрический заряд», — представлял себе, как, натирая янтарь, в него вталкивают некое невесомое электрическое вещество, заряжают янтарь электричеством. Подобно тому, как заряжали когда-то пушку, вталкивая в неё стальное ядро.

Любопытно, что в английском языке в роли нашего слова «заряд» используют слово *charg* (произносится: чардж), имеющее много значений, в том числе «цена», «нагрузка», «обязанность». Так что в этом случае «электрический заряд» по смыслу, видимо, означает «электрическая цена», то есть мера электрических свойств.



ВК-19. *Показатель степени — это удобный способ записи*

больших (малых) и очень больших (очень малых) чисел. Показатель — маленькая цифра вверху справа от основной (основания) — говорит о том, сколько раз это основание нужно умножить само на себя. Особо удобно основание «10» — его показатель степени сообщает количество знаков (нулей) у итогового большого числа. Показатель степени с минусом переводит итоговое большое число в знаменатель дроби, превращая результат в маленькое число.

Т-18. **При своём рождении наша Вселенная получилась такой, что практически у всех атомных частиц есть масса, а у некоторых к тому же есть ещё и электрический заряд**. Атомы состоят из атомных частиц, а все вещества — из атомов. Почти все атомные частицы имеют такое свойство, как масса (исключение — неуловимо малая частица нейтрино, массу которой уже много лет пытаются обнаружить, но пока не обнаружили, по предсказаниям некоторых теоретиков — не обнаружат). Все вещества состоят из атомов, и поэтому у любого физического тела, у любого предмета есть масса. У стального шарика она побольше, у бумажного — поменьше, но ещё никто не видел шарика без массы. А вот электрический заряд есть не всегда — если янтарную палочку не натирать, то у неё вроде бы нет никаких электрических свойств, нет никакого заряда. Оговорка «вроде бы» использована здесь со значением, и вы вскоре в этом убедитесь.

Все эти пояснения, как и предыдущие упоминания о происхождении Вселенной и истории человечества, должны приучить к мысли о том, что электрические силы, как и гравитационные, — это наследство, полученное нами вместе с самим нашим миром, его составная часть. В природе электричество играет очень важную, можно сказать, фундаментальную роль, — без него, без электричества, никакого такого мира не было бы вообще. Достаточно сказать, что все атомы и молекулы существуют благодаря действию электрических сил. Однако подавляющая часть электрической активности, электрических действий как бы скрыта от нас, человек сотни тысяч лет встречал электричество только в виде пугающей его с небес молнии. И весь наш огромный и разнообразный электрический мир, все приборы, аппараты, системы и машины, всё это было «от нуля» придумано человеком, который первый раз, образно говоря, взял в руки электричество в опытах с янтарной палочкой.

Размер Вселенной - 10^{23} км
Размер Галактики - 10^{18} км
Размер Солнца - $1,5 \cdot 10^{6}$ км
Размер Земли - $12 \cdot 10^{3}$ км
Масса Солнца - $3 \cdot 10^{30}$ кг
Размер атома - 10^{-8} см
Размер протона - 10^{-13} см
Масса электрона - 10^{-27} г
Масса протона - $1,7 \cdot 10^{-24}$ г
Количество клеток в организме человека - 10^{13}
Число чужеродных клеток в организме человека - 10^{14}

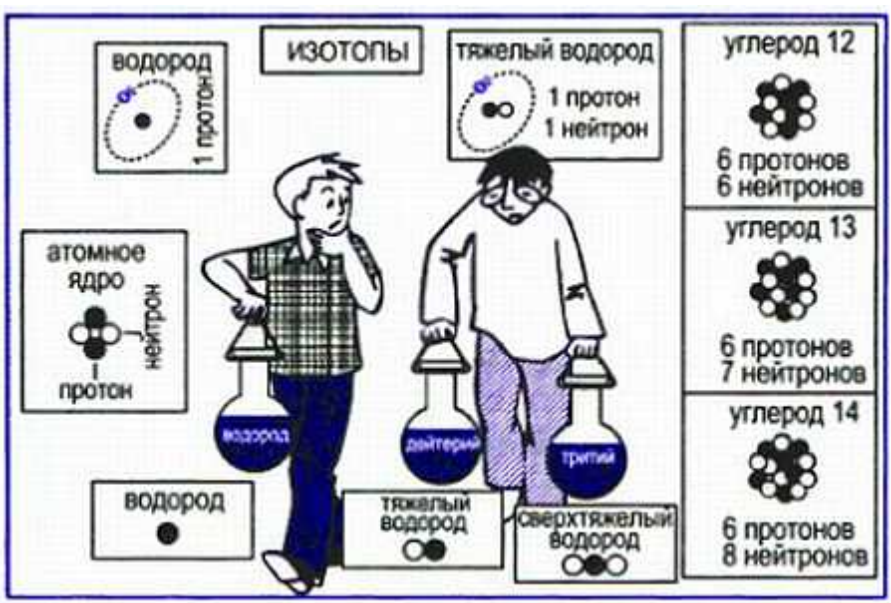
ВК-20. *Человек и окружающие его предметы по размерам занимают как бы среднее положение в мире. Привычные для нас масштабы, грубо говоря, от миллиметра до километра, а размеры самого человеческого тела один-два метра. Вместе с тем в микромире предметы несравнимо более мелкие, типичный их размер миллиардные доли метра (нанометры) и меньше. А во Вселенной мы видим конструкции, например звёздные системы галактики, которые в триллионы триллионов раз больше метра.*

Т-19. **Человек ищет помощников.** Мы уже вспоминали про человеческий инстинкт экономии сил (Т-13), во все времена он подталкивал изобретательную публику, заставлял придумывать приспособления и машины, которые становились, как сказал один известный экономист, продолжением человеческой руки. Особенно, конечно, хотелось привлечь на помощь не очень-то могучим человеческим мускульным силам какие-то внешние силы, природную энергию. Что-то подсказали тяжёлые камни, которые тащила за собой горная лавина, или сваленные деревья, которые река с лёгкостью перебрасывала на огромные расстояния. Потом пришло время тепловых машин. Сначала заработал сжатый пар, а затем и взрывающиеся при сгорании микроскопические порции бензина или дизельного топлива — их энергия и сегодня двигает около миллиарда автомобилей, которые бегают по дорогам земного шара, и почти 60 тысяч больших самолётов.

Очень может быть, что первые исследователи электричества думали о нём, как о будущем помощнике человека: электричество

уже двигает мелкие предметы, а дальше, как говорится, дело техники. Заставили же ветер, который слегка раскачивает ветки на дереве, крутить лопасти ветряной мельницы и, надувая паруса, двигать по морям огромные корабли.

Т-20. **В природе есть несколько видов фундаментальных сил, электричество — одна из них.** Электричество, электрический заряд — не единственное спрятанное от человека, но всё же открытое им особое свойство вещества, которое так же, как и масса, демонстрирует свою силу. Несколько тысячелетий назад у некоторых металлических руд были обнаружены ни на что другое не похожие магнитные свойства, которые не хуже гравитации и электричества могут двигать физические тела. В начале нашего века было открыто ещё одно, совершенно новое качество вещества, которому дали название барионный заряд, он создаёт особый сорт основных природных сил — сильные ядерные силы. Это не гравитация, не электричество, не магнетизм, а нечто совсем иное, действующее совершенно самостоятельно. Ядерные силы, казалось бы, навсегда спрятались от нас, так как действуют они только на очень небольших, на абсолютно невидимых расстояниях — около триллионной доли миллиметра. Именно сильные ядерные силы каким-то своим собственным способом стягивают, склеивают составные части атомного ядра, которые без этого из-за одноимённых электрических зарядов протонов (+) просто разлетелись бы в разные стороны.



ВК-21. *Атомы химических элементов отличаются числом*

протонов в ядре, сегодня известны атомы с числом протонов от 1 до 118. В ядре находятся ещё и нейтроны — примерно как протон, частицы без электрического заряда, они влияют лишь на массу ядра. Атомы с разным числом нейтронов называют изотопами. В нормальном атоме на орбитах столько же электронов (—), сколько протонов (+) в ядре и общий электрический заряд атома равен нулю — атом электрически нейтрален. Но так бывает не всегда.

При первом знакомстве с атомом до предела упрощают все, что в нем происходит и пользуются одним из вариантов его планетарной модели.
1
ЦЕНТРОБЕЖНАЯ СИЛА
НИТКА
В планетарных моделях часто указывают число протонов в ядре а также количество электронов на разных орбитах.
2
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПРИТЯЖЕНИЕ
ЯДРО
(протоны и нейтроны)
ЭЛЕКТРОН
ПЛАНЕТАРНАЯ МОДЕЛЬ АТОМА: ЭЛЕКТРОНЫ (-) ПРИВЯЗАНЫ К ЯДРУ (+) ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПРИТЯЖЕНИЕМ
Планетарными модели атома называют потому, что они напоминают нашу Солнечную систему.
3
ГРАВИТАЦИОННОЕ ПРИТЯЖЕНИЕ
ЗЕМЛЯ
МАРС
СОЛНЦЕ
МЕРКУРИЙ
ВЕНЕРА
ЮПИТЕР

Р-5. ПЛАНЕТАРНАЯ МОДЕЛЬ ПОЯСНЯЕТ, КАК СТРОЯТСЯ СТО РАЗНЫХ АТОМОВ ИЗ ТРЁХ ЧАСТИЦ. Сказанное в пояснениях к рисунку Р-4 наверняка вызвало удивление: как это так миллионы веществ собраны всего из трёх разных частиц? В чём секрет такого фантастического многообразия при столь малом количестве (всего три!!!) исходных деталей?

Начнём с того, что протон, нейтрон и электрон участвуют в создании разных веществ не индивидуально, не по одному, а в составе разных строительных блоков — атомов. Атом устроен и работает несравнимо сложнее, чем это показано в его планетарной модели (**2**), но именно этой моделью атома мы будем пользоваться в книжке. Хотя бы потому, что изучение истинного устройства атома и протекающих в нём процессов потребует во много раз больше времени, чем вся наша образовательная кампания по знакомству с электричеством.

Самый наглядный вариант планетарной модели — рука, раскручивающая привязанный на крепкой нитке спичечный коробок (**1**). В простейшем случае (в атоме водорода) на месте руки будет атомное ядро с одним протоном, а вместо спичечного коробка — один

электрон. В более сложных атомах протонов в ядре больше, и столько же электронов на круговых орбитах вокруг ядра (**2**). Подобная модель названа планетарной потому, что она напоминает схему движения планет вокруг Солнца (**3**). Возможны достаточно прочные, устойчивые атомы, в ядре которых до ста протонов (+) и на орбитах столько же электронов (—). Благодаря равенству положительных (протоны) и отрицательных (электроны) электрических зарядов вещество, состоящее из таких атомов, не демонстрирует каких-либо явных электрических свойств. Так же как не натёртая пластмасса или не натёртое стекло (Р-1).

А потом в мире атомов открыли ещё одно фундаментальное свойство материи, ещё один вид особых сил — их назвали слабыми ядерными силами, хотя действуют эти слабые силы во много раз сильнее, чем гравитация.

Вот так-то… Всё было просто, была известна одна гравитация, а теперь вон сколько открылось важнейших сил, действующих в нашем мире и полученных в наследство от Большого взрыва. Так что мир наш намного сложней, чем кажется человеку, который, подобно своему доисторическому предку, видит лишь то, что видно с первого взгляда.

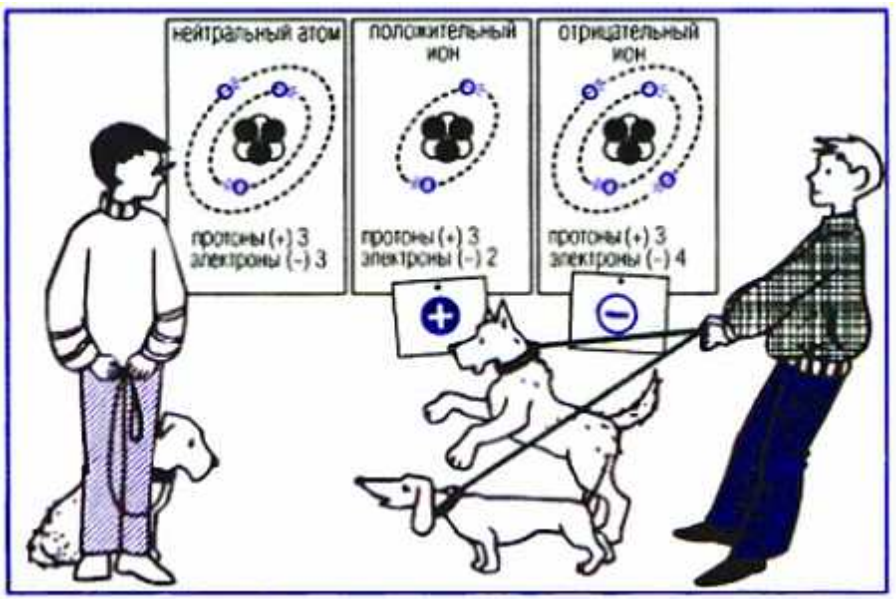
Гравитацию, электричество, магнетизм, сильные и слабые силы называют основными, фундаментальными силами природы. Они, если разобраться, в итоге приводят в действие всё, что происходит: вращение планет, химические реакции, тепловые процессы, взрыв атомной бомбы, падение метеорита, считывание любимой мелодии с магнитофонной кассеты.

Здесь самое время заметить, что современная физика пытается увидеть более простую картину. Теоретики ищут возможность поддержать представление о единой природе, о «великом объединении» всех известных сил — сильных, слабых, магнитных, электрических и гравитационных. Один из фрагментов такого объединения обнаружился ещё двести лет назад: оказалось, что электричество и магнетизм не две отдельные, независимые силы — это просто два разных проявления единого электромагнитного процесса. А сравнительно недавно эксперименты подтвердили теорию, объединившую электромагнитные и слабые ядерные силы в едином, как его называют, электрослабом взаимодействии.

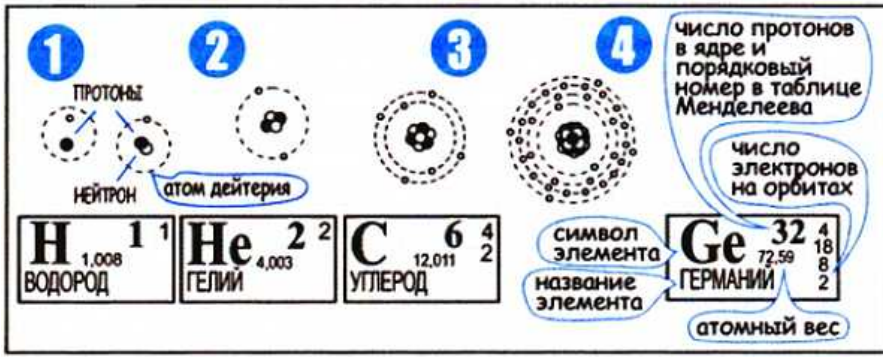
В названии этого раздела мы не случайно использовали слово «несколько», вместо того чтобы привести и прокомментировать

точную цифру. Ещё не очень давно считалось, что в природе есть пять главных сил. Затем была открыта единая природа электричества и магнетизма, и стали считать, что главных сил четыре. Наконец, электрослабое взаимодействие заставляет говорить о трёх основных силах природы — похоже, что действительно дело идёт к великому объединению. Несмотря на это, мы при необходимости будем говорить о пяти главных силах нашей природы, так как каждая из них очень часто действует самостоятельно.

Но вернёмся, однако, от этой чрезвычайно интересной физики к главной нашей теме — к электричеству.



ВК-22. *Электрические свойства электрона и протона, их электрические заряды по величине одинаковы. И суммарный заряд электронов (—) в атоме равен суммарному заряду протонов (+). Эти заряды уравновешивают друг друга, и атом в целом электрических свойств не проявляет. Но если убрать электрон из атома, то он превратится в положительный ион — атом с преобладанием положительного заряда. Появление лишнего электрона превратит атом в отрицательный ион, в атом с преобладанием «минуса».*



Р-6. ПАСПОРТ ДЛЯ КАЖДОЙ РАЗНОВИДНОСТИ АТОМОВ. Предполагается, что вся наша огромная Вселенная родилась в результате мощнейшего, как его называют, Большого взрыва. Мы ещё посвятим ему несколько картинок с короткими примечаниями — человек должен хоть что-то знать о своей истории. А пока отметим: предполагается, что уже через несколько секунд после взрыва температура первоначального немыслимо горячего вещества заметно снизилась и в нём стали появляться ядра самых простых атомов — атомов водорода (1). Затем стал возможен ещё один процесс — некоторые водородные ядра, объединившись, превращались в ядро атома гелия (2). Хорошо известные нам теперь более сложные и значительно более сложные атомы стали появляться через миллионы лет, когда зажглись звёзды.

Некоторые важные особенности атома можно отобразить в небольшой записи, условно назвав её паспортом. Именно такие паспорта на этом рисунке сделаны для четырёх атомов (1, 2, 3, 4), а на рисунке Р-7 в таблице Менделеева вы увидите их для большинства известных атомов. Название атома — это, по сути, название чистого вещества, которое из этих атомов состоит. Так, например, газ водород состоит из атомов по имени водород. Самая приметная цифра в паспорте указывает число протонов в ядре и число электронов на орбитах, и она же есть порядковый номер элемента в таблице Менделеева.

Физики доказали, что на первой, на самой близкой к ядру орбите, где энергия электронов минимальна, их может быть не более 2, на второй орбите до 8, на третьей — до 18. У некоторых крупных атомов есть орбиты, на

которых до 32 электронов, но никогда на внешней орбите не может быть более 8 электронов.

В атомное ядро входят не только протоны, но ещё и нейтроны, когда нужно отметить их количество, атом называют изотопом. Нейтроны практически не влияют на химические свойства атома, но имеют такую же, как у протона, массу и такой же барионный заряд (Р-10). Средняя масса атомов (на этом рисунке под порядковым номером) получается дробной потому, что набор изотопов и их количество в природе в основном определяет сама природа.

***Т-21*. К электричеству нужно просто привыкнуть, как мы от рождения привыкли к гравитации.** Нетрудно самому на кухонном столе проделать несколько опытов, которые в древние времена удивили греков. Не страшно, если у вас нет янтарной палочки, потрите шерстяной тканью пластмассовую расчёску и посмотрите, как она тянет к себе клочки бумаги. Это не гравитация — бумажки не падают, а тянутся вверх. Это не магнетизм — магнит бумагу не притягивает. Это — электричество, одна из важнейших важностей нашего мира.

Электричество и гравитация в чём-то очень похожи, и работают они по очень похожим правилам. Гравитационное притяжение тем сильнее, чем больше взаимодействующие массы: килограммовая гиря тянется к земле и давит на чашку весов сильнее, чем стограммовая. Электрическое притяжение тем сильнее, чем больше электрические заряды, то есть электрические свойства взаимодействующих предметов. Потрёшь расчёску слегка, электрический заряд у неё образуется небольшой, и она слабо тянет мелкие бумажки. А натрёшь расчёску посильнее, электрический заряд у неё окажется побольше, и сила притягивания лёгких предметов тоже увеличится.

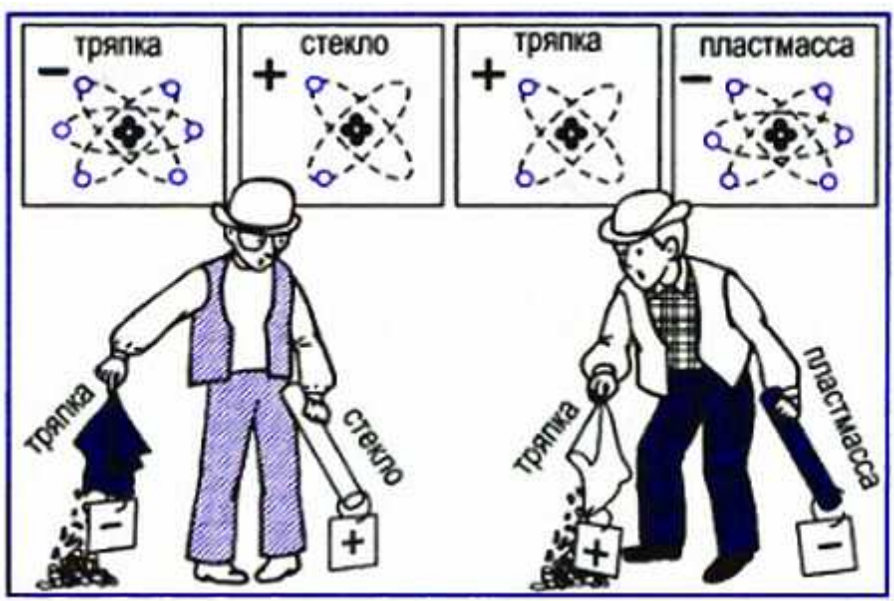
Для того чтобы почувствовать реальность таких понятий, как «гравитация», «масса», «сила тяжести», не нужно раскрывать учебник физики, достаточно положить его на ладонь. Мы непосредственно воспринимаем массу, ощущаем её, чувствуем массу своего тела, массу покупки, которую несём из магазина, массу упавшего на ногу камня.

Электрический заряд, конечно, на ощупь не почувствуешь, природа не снабдила нас «чувством электричества». Но и без этого ясно, что электричество есть, что это абсолютная реальность, — другого вывода не сделаешь из опытов с натиранием расчёски. Конечно, масса — понятие привычное,

человек привыкал к нему миллионы лет, а с электричеством мы сталкиваемся всего несколько десятилетий. Так что в него, кроме всего прочего, ещё нужно поверить, к нему нужно привыкнуть.

Т-22. **Электричество бывает двух видов, двух сортов, и придумали им такие названия: «положительное электричество» и «отрицательное электричество».** В результате гравитационного взаимодействия физические тела только притягиваются друг к другу, пока ещё никто не наблюдал антигравитации, то есть не привычного притяжения, а гравитационного расталкивания двух тел. Скорее всего потому, что в природе существует масса только одного сорта, и любые две массы взаимодействуют только так — они взаимно притягиваются.

Одинаковость, однотипность массы проверена с колоссальной, просто-таки фантастической точностью — до миллионных долей миллионной доли процента. Но факт существования только одного сорта массы настолько важен, что физики планируют ещё более точную его проверку: а вдруг окажется, что есть такой вид массы, который отталкивается от нашей, привычной? Вот тут уж мы полетаем над землёй и в космосе — без моторов, без топлива, совершенно бесплатно, за счёт одной только антигравитации.

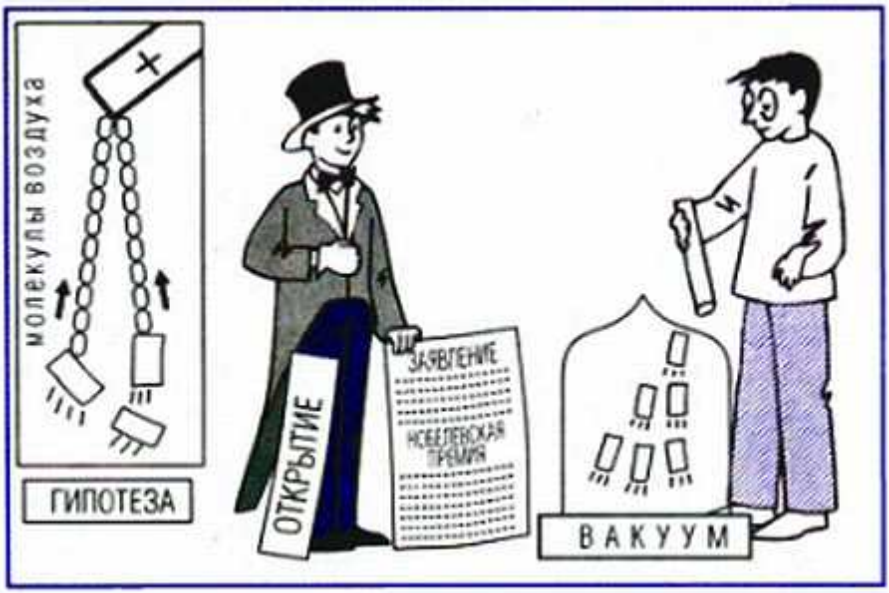


ВК-23. *Натирая стекло тряпкой, мы из многих атомов на его поверхности, грубо говоря, выдираем электроны, в стекле появляются положительные ионы, то есть положительный заряд.*

Электроны из стекла переходят на тряпку, и она приобретает отрицательный заряд. А при натирании пластмассы в атомы на её поверхность переходят электроны с тряпки, которой осуществляли натирание, — в пластмассе появляются отрицательные ионы и суммарный «минус», а у тряпки — «плюс».

В отличие от массы электричество бывает двух разных сортов, и в этом может убедиться каждый, проделав опыты с натиранием стеклянной и пластмассовой палочек. На обеих палочках при их натирании появляется электрический заряд — обе они притягивают мелкие клочки бумаги. Но на стеклянной палочке и на пластмассовой появляются заряды разного сорта, и это будет незамедлительно доказано с помощью очень простого эксперимента.

Если появившиеся при натирании заряды передавать с палочек на два лёгких пенопластовых шарика, подвешенных на нитках, то обнаружится, что в разных случаях эти наэлектризованные шарики ведут себя по-разному. Шарики, получившие электрический заряд разных сортов (один шарик от стеклянной палочки, другой — от пластмассовой), взаимно притягиваются. Шарики, получившие электрический заряд одного и того же сорта (оба от стеклянной палочки или оба от пластмассовой), отталкиваются. Если бы электричество было только одного сорта, то взаимодействие зарядов всегда было бы одинаковым — независимо от того, какими палочками вы прикасались бы к шарикам, они всегда либо только притягивались бы, либо только отталкивались. Таким образом, из наших опытов как раз и следует, что электричество бывает двух сортов: электрические заряды одного и того же сорта, или, иными словами, одноимённые электрические заряды, как бы не любят друг друга (Т-8) и взаимно отталкиваются, разноимённые — взаимно притягиваются.



ВК-24. *Мы подробно обсудили натирание пластмассы и стекла, но один вопрос остался без ответа. Почему к наэлектризованным предметам притягиваются мелкие клочки бумаги, у которых вроде бы нет никакого своего заряда? Когда-то были придуманы фантастические молекулярные цепочки, которые могли бы тянуть бумагу, но эта идея блестяще провалилась, когда опыт повторили в вакууме. Там молекулярных цепочек вообще не могло быть. К счастью, нашлось другое объяснение — поляризация (ВК-25).*

Два разных сорта электричества нужно было как-то назвать, скажем, электричество сорта А и электричество сорта Б. Или электричество «Жёлтое» и «Зелёное». Или, наконец, «Стеклянное» и «Пластмассовое». Однако тому, кто давал имена этим двум разным сортам, понравились другие слова, и он назвал два разных сорта электричества «Положительным» (сокращённое обозначение +, «плюс») и «Отрицательным» (-, «минус»). В данном случае привычный для нас смысл этих слов не имеет никакого значения, и ни в коем случае не нужно думать, что положительное электричество чем-то лучше отрицательного, как, скажем, положительный литературный герой или положительный пример.

Электрический заряд, который назвали положительным, появляется у натёртого стекла, отрицательный — у натёртой пластмассы. Попробуем провести такой мысленный эксперимент: будем ломать, распиливать, крошить наэлектризованные стекло и

пластмассу, чтобы найти в них самые маленькие порции электрического заряда.

Начнём со стекла.

Т-23. **В наэлектризованных палочках у некоторых молекул чувствуется электрический заряд.** Мысленный эксперимент, кроме всего прочего, хорош тем, что любая трудная работа здесь идёт легко и быстро. Вот и у нас уже появились сначала маленькие кусочки наэлектризованного стекла, затем очень маленькие и наконец самые маленькие его частички с хорошо известным названием — «молекула». Оно происходит от латинского слова «моле» — «масса», так что слово «молекула» означает «маленькая масса, массочка».

Можно, конечно, и появившиеся у нас молекулы стекла разделить на составные части, но то, что при этом получится, уже не будет стеклом. Здесь, пожалуй, уместно такое сравнение. Представьте себе, что вам нужно разделить на районы город. Самый маленький район, который может получиться, — это один дом, молекула большого города. Можно, конечно, и дом разобрать по частям, но вряд ли оконную раму или водопроводный кран можно будет назвать районом города.

Измельчая в мысленном эксперименте предварительно натёртые, то есть наэлектризованные, стекло и пластмассу и в итоге получив их молекулы, мы обнаружим, что некоторые молекулы тоже наэлектризованы, то есть тоже обладают электрическими свойствами, а другие — не обладают. Остаётся предположить, что электрический заряд молекулы находится в какой-то ещё более мелкой частице, которая или входит или не входит в молекулу. И если входит, то делает эту молекулу наэлектризованной. А если не входит, то молекула остаётся электрически нейтральной.

Чтобы проверить эту гипотезу, продолжим свой мысленный эксперимент и разделим наэлектризованную молекулу на составные части.

ВК-25. *Предположим, что в этих больших пластиковых мешках ионизированный газ с беспорядочным расположением зарядов (слева), и поэтому с нулевым внешним электрическим полем. Поднесённый к одному из мешков (справа) стержень с положительным электрическим зарядом осуществил так называемую поляризацию газа, притянул к себе электроны и оттолкнул положительные заряды, создав две области с зарядом + и —. Во многих случаях каждая из них может вести себя как отдельный заряд.*

Р-7. ЧЕЛОВЕК, КОТОРЫЙ УВИДЕЛ ПОРЯДОК В ПОЛНОМ ХАОСЕ. Так же энергично, как другие области знаний, химия развивалась с началом эпохи Возрождения. В обиход вошло представление о химическом элементе как о чистейшем веществе, которое в другие вещества уже не превращается. Вместе с тем получалось, что каждый элемент был создан природой как бы самостоятельно и не был частью какой-либо единой системы. В 1869 году профессор общей химии Петербургского университета и руководитель химической лаборатории Петербургского технологического института Дмитрий Иванович Менделеев отправил в ведущие научные учреждения России и других стран сообщение об открытой им системе химических элементов. В этой системе химические свойства элементов изменялись по мере роста их атомной массы, но в то же время эти свойства в какой-то мере повторялись периодически, через определённое число шагов увеличения массы. В построенную на основе этой системы первую таблицу Д.И. Менделеева вошло 66 элементов, известных в то время, но элементам, открытым позже, всегда находилось место в ней. В апреле 2010 года в таблице Менделеева было 118 химических элементов, из них 94 имеются в природе, остальные получены на ускорителях,

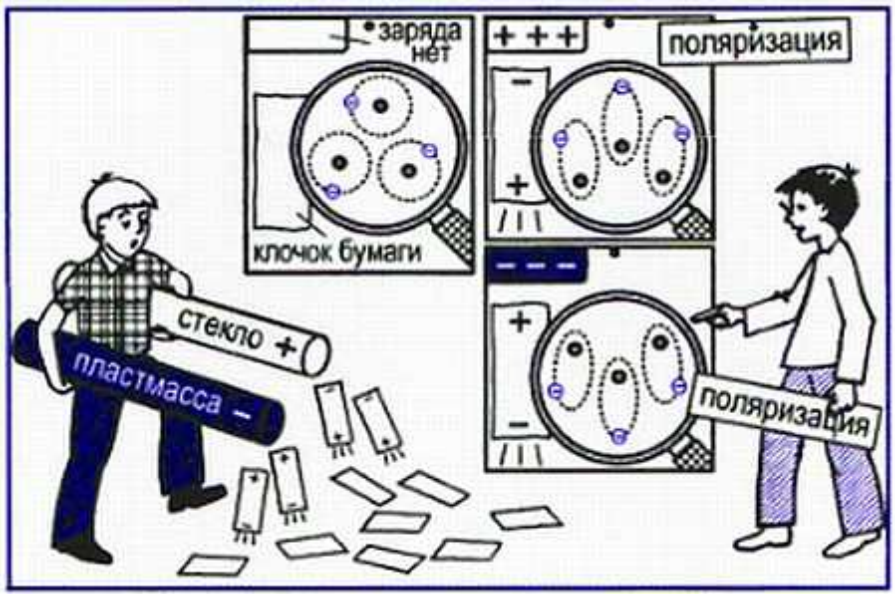
причём некоторые живут доли секунды и тут же распадаются. Главная сила представлений Д.И. Менделеева в том, что они появились лишь из глубокого понимания химии, когда практически ничего ещё не было известно об устройстве атомов. Эти представления не теряли свою силу, а получали лишь подкрепление и поддержку с принятием планетарной модели атома (1911 г.), при открытии протонов (1919 г.), нейтронов (1932 г.) и законов формирования электронных оболочек (1926, 1951 гг.). На рисунке показан несколько упрощённый вариант таблицы элементов, построенной на основе открытого Д.И. Менделеевым периодического закона. Синим цветом приближённо указан атомный вес элемента, который значительно больше веса всех протонов (порядковый номер элемента) за счёт появившихся в ядре нейтронов.

Т-24. **В поисках элементарного, то есть самого маленького в природе, электрического заряда мы разбираем молекулу на атомы**. Молекул а любого вещества состоит из типовых блоков — из атомов. Всего сегодня известно 118 основных типов различных атомов. Из них 92 вида атомов устойчивы, остальные со временем сами по себе распадаются на составные части, причём некоторые очень быстро — за малые доли секунды. Химики называют атомы разного типа химическими элементами, имея, очевидно, в виду, что это и есть элементарные блоки, из которых собраны все природные и искусственные вещества.

В молекулу могут входить самые разные атомы и в самом разном количестве (в молекуле воды — три атома, в молекуле белка — десятки тысяч), атомы могут по-разному соединяться друг с другом, образовывать различные пространственные конструкции. И в итоге из небольшого сравнительно количества элементов (118 — это тоже немного, но в строительстве молекул в основном используется 40–50 разновидностей атомов) получаете я огромное количество комбинаций, образуются миллиарды самых разных веществ. Разные сочетания разных атомов дают воздух и воду, мрамор и зелёный лист винограда, соль и сахар, стекло и пластмассу.

Продолжив свой мысленный эксперимент и разобрав на части молекулы подопытных веществ — стекла и пластмассы, — мы обнаружим, что и среди атомов попадаются совершенно, казалось бы, одинаковые на вид, но при этом разные по своим

электрическим свойствам. Мы обнаружим наэлектризованные атомы и не наэлектризованные, другими словами, атомы с электрическим зарядом и без него, то есть электрически нейтральные. И после этого нам не остаётся ничего другого, как в поисках мельчайшей порции электрического заряда разобрать на части сам атом.



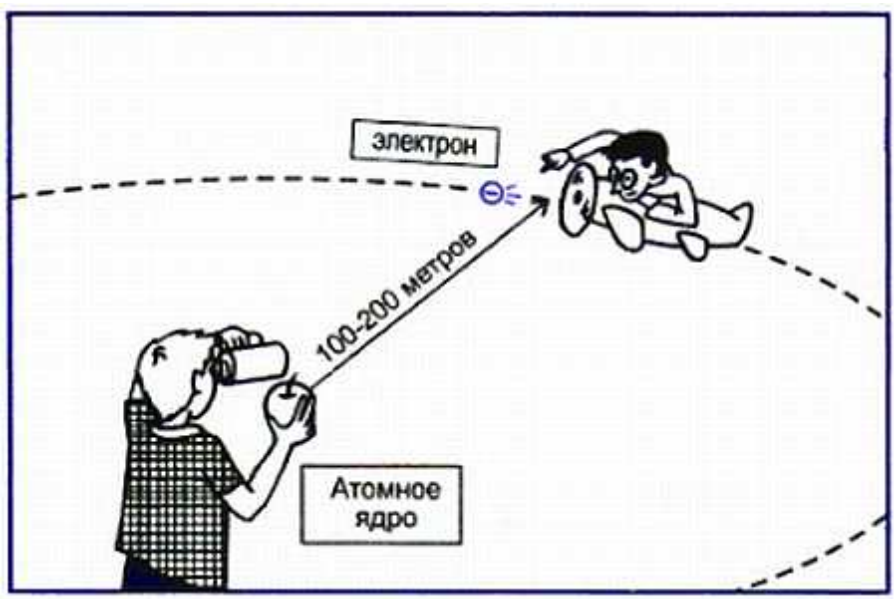
ВК-26. *В мелких клочках бумаги под действием электрического поля наэлектризованного предмета тоже происходит поляризация. Но не за счёт перемещения атомов, а за счёт некоторого вытягивания их электронных орбит. В результате этой массовой деформации орбит в одной части бумажного лепестка оказывается более сильным положительный заряд, а в противоположной части — отрицательный. Одну из этих частей и притягивает наэлектризованный предмет, заставляя двигаться весь лепесток.*

Т-25. **Несколько похвальных слов моделям и моделированию**. Склеенная из пластмассы модель самолёта или даже летающая его модель лишь в небольшой степени похожи на воздушный лайнер, который берёт на борт сотню пассажиров. Но вместе с тем, рассматривая эти модели, можно узнать много важного о настоящих самолётах, об их устройстве, об основных деталях, о том, для чего эти детали нужны. Ещё одна разновидность модели — чертежи, на них отрабатывается и предварительно проверяется будущая реальная машина. На чертежах, например, без огромных затрат на постройку реальных

образцов, проверяют, как соединятся, состыкуются будущие детали самолёта.

Здесь хочется сказать несколько слов о самом этом понятии «модель», о котором надо бы написать отдельную книжку, а ещё лучше — никем пока, к сожалению, не запланированный школьный учебник.

Умение строить модели можно встретить только у живых организмов, кварцевый кристалл или горная река моделей не строят. Да и в мире живого у первых примитивных его представителей тоже не было никаких приспособлений, чтобы строить модели. А те, у кого такие приспособления появлялись, получали огромное преимущество, они чаще побеждали в борьбе за существование, их род успешно продолжался и совершенствовался. К примеру, древние насекомые, охотясь за пищей, создавали в особых своих нервных узлах (из них у некоторых видов в дальнейшем образовался мозг) своего рода химический чертёж, модель этой охоты. Порывшись в памяти, они проверяли, годится ли намеченная жертва на обед, на модели обстановки определяли, куда «пища» перемещается, как надо двигаться самому, чтобы перехватить её. Именно такое моделирование вместо бесконечных проб и опасных ошибок оказалось могучей движущей силой развития живых существ.

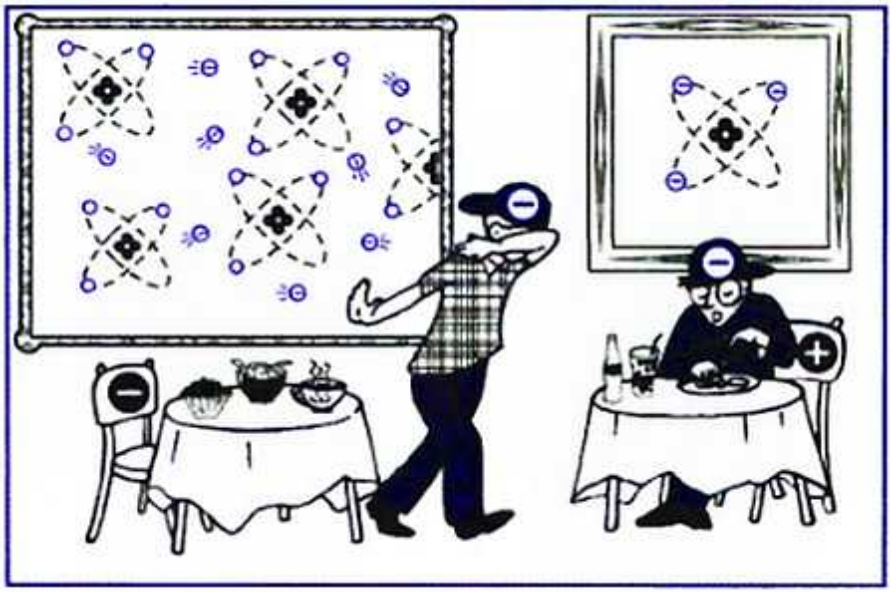


ВК-27. *Атом в действительности очень «воздушная» конструкция, в нём много «пустоты». Если представить себе атомное ядро размером с яблоко, то в этом масштабе окажется,*

что электроны размером с пылинку вращаются вокруг ядра на расстоянии десятки и сотни метров. Большими бывают и межмолекулярные объёмы, где могут двигаться заряды. Но их подвижность, выраженная в конечном счёте величиной сопротивления, зависит не только от свободного пространства для перемещений.

Пришло время, появился Человек Разумный, мозг которого постепенно научился особо эффективно работать с моделями. И сейчас всё, о чём мы думаем, вспоминая, например, о вчерашнем дне, проверяя планы на завтра, погрузившись в грустные думы о ремонте автомобиля, предвкушая вкусный обед, обдумывая газетную статью, анализируя семейный конфликт или партию в шахматы, — всё это работа с мысленными моделями предметов, событий и действий. Мы умеем работать с моделями, созданными на основе разговорного языка, геометрических построений, математических формул, чертежей, химических уравнений, компьютерных программ. Мы умеем работать с моделями уже не только в уме, а во внешних вспомогательных устройствах, таких как компьютеры, книги, географические карты, фотографии. Всё это стало важнейшим инструментом познания мира и, может быть, даже основным слагаемым нашего нынешнего могущества.

Т-26. **Планетарная модель атома — в центре массивное ядро, вокруг него вращаются электроны.** Слово «атом» в переводе с греческого означает «неделимый». Это название появилось очень давно, когда о настоящих атомах, в современном понимании этого слова, никто и представления не имел. Просто считалось, что всякое вещество можно дробить на части до тех пор, пока не получатся мельчайшие невидимые пылинки, которые дальше уже разделить нельзя, невозможно. Именно эти гипотетические, то есть предполагаемые, неделимые пылинки древнегреческие философы и называли атомами. Позднее название «атом» перешло к частицам уже не гипотетическим, не придуманным, а совершенно реальным, обнаруженным в экспериментах. К тем самым основным блокам, из которых строятся разные молекулы, разные вещества. То, что молекулы собраны из атомов, было доказано в самых разных экспериментах и даже показано на специальных фотографиях с особо сильным увеличением.



ВК-28. *Подвижность свободных зарядов в веществе, которое мы называем проводником, зависит от многих характеристик этого вещества. Прежде всего, конечно, от того, насколько легко образуются в нём ионы или насколько внешние электроны связаны со своим атомным ядром, насколько легко они могут уйти из атома. Кроме того, важно и то, как ведёт себя само вещество, насколько оно способствует или препятствует перемещению зарядов, насколько поддерживает это движение или противодействует ему.*

H_2O - вода
H_2O_2 - перекись водорода
CO - угарный газ
CO_2 - углекислый газ
1
Даже один дополнительный атом в какой-либо молекуле может резко изменить её свойства, а значит и свойства вещества, собранного из таких молекул.
фруктоза
$C_6H_{12}O_6$
глюкоза
$C_6H_{12}O_6$
2
Молекулы двух разновидностей сахара фруктозы и глюкозы имеют совершенно одинаковый состав атомов (химических элементов) - 6 атомов углерода C, 12 атомов водорода H и 6 атомов кислорода O. Но из-за того, что атомы расположены и связаны несколько по разному, из них получаются два различных сахара - в частности, глюкоза почти в два раза слаще фруктозы.

Р-8. МОЛЕКУЛЫ — ГЛАВНЫЙ ПУТЬ К

МНОГООБРАЗИЮ. После знакомства с атомами с разным числом протонов в ядре (Р-7) сделаем следующий шаг на пути к многообразию веществ. Мы соберём из разных атомов ещё более сложные блоки вещества — молекулы. Даже в сравнительно небольших молекулах добавление одного атома или замена одного из них на другой может резко изменить свойства вещества, состоящего из таких молекул. Более того, даже молекулы, одинаковые по химическому составу, то есть имеющие одно и то же количество определённых атомов, могут создавать совершенно разные вещества, если эти атомы расположены и соединены по-разному.

В качестве примера возьмём хорошо знакомое всем вещество по имени пищевая сода. Её формула $NaHCO_3$ напоминает, что в молекуле этого вещества по одному атому натрия, водорода и углерода и три атома кислорода. Но если заменить атом водорода H на ещё один атом натрия Na, то получится совершенно непригодная для пищи кальцинированная сода Na_2CO_3 важнейший компонент многих отраслей промышленного производства, в частности производства стекла. Особенно велики возможности изменить подобным образом свойства какого-нибудь лекарственного либо биологического вещества, молекулы которого нередко состоят из многих тысяч атомов.

Ещё каких-нибудь сто лет назад некоторые учёные, как и древнегреческие философы, считали эти блоки, из которых собраны молекулы, неделимыми и с чистой совестью называли их атомами. И только в начале прошлого века (он начался в 1900 году и завершился совсем недавно — в 2000 году) выяснилось, что атом, строго говоря, нельзя называть атомом, что атом не есть какой-то неделимый шарик, он представляет собой сложную машину и состоит из множества разнообразных деталей.

Одна из удобных и очень полезных моделей атома похожа на наше Солнце с планетами, её так и называют — «планетарная модель атома».

В центре планетарной модели — основная деталь атома, его ядро, массивный шар (Т-8), в котором сосредоточена почти вся атомная масса. Вокруг ядра вращаются маленькие и лёгкие шарики (Т-8) — электроны, они напоминают планеты, которые вращаются вокруг Солнца (Р-5). Такая картина очень наглядна, её легко себе представить, однако планетарная модель — это очень

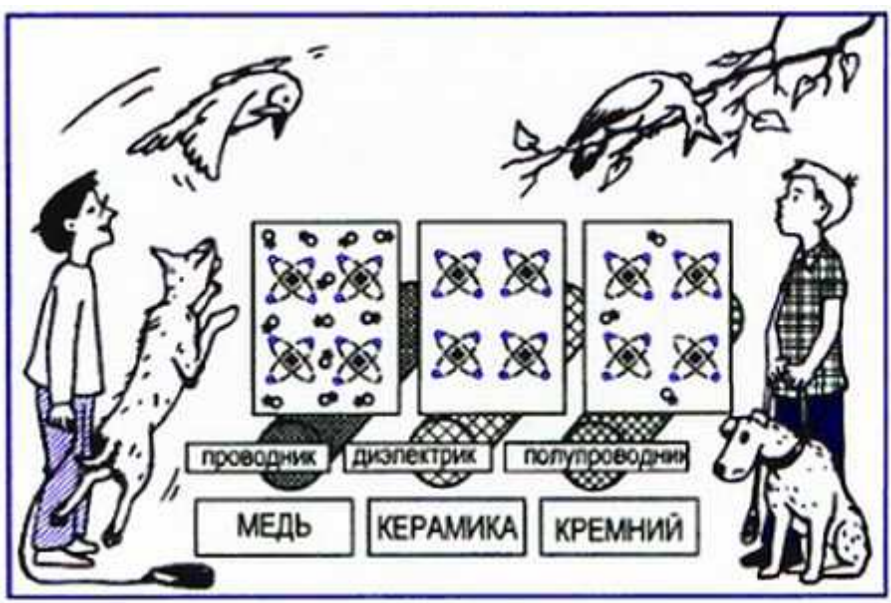
сильное упрощение, сильное искажение истины.

Скажем, электроны — это совсем не шарики-пылинки, а некоторые во многом ещё загадочные сгустки материи, которые ведут себя не только как частицы, но и как волны. Это значит, что в каких-то случаях электроны подобно частицам отскакивают, отражаются от препятствия, а в каких-то случаях огибают его, подобно волне, которая перекатывается через прибрежный камень. И двигаются электроны в атоме не по спокойным круговым орбитам, как Венера или Земля вокруг Солнца. Электроны как бы размазаны в пространстве, распределены по сферам вокруг ядра, образуют вокруг него так называемые электронные оболочки.

Разумеется, само ядро — тоже не бильярдный шар. Во-первых, оно собрано из нескольких типов частиц, которые, в свою очередь, тоже «склеены» из деталей. Во-вторых, ядро — это не застывшая конструкция, а скорее, бурлящий котёл, в котором непрерывно идут сложные превращения вещества и энергии, рождаются и умирают частицы.

И всё же планетарная модель, несмотря на все её недостатки, помогает просто и правильно объяснить многие важные процессы в атоме, многие особенности его конструкции. Именно поэтому своё путешествие в атомные миры мы начнём с того, что построим упрощённую действующую планетарную модель самого простого из известных атомов — атома водорода.

В предыдущей фразе нет ошибки — мы построим именно действующую модель атома.



ВК-29. *Каждое вещество имеет свою точную характеристику «удельное сопротивление», которая говорит о том, насколько оно содействует упорядоченному движению электрических зарядов. В целом же все вещества делятся на три большие группы: «проводники», «изоляторы» и «полупроводники». Первые создают особо благоприятные условия для движения зарядов, в изоляторах такое движение практически невозможно. А полупроводники занимают промежуточное положение между первыми двумя группами.*

Т-27. **Действующая модель атома водорода**. Привяжите нитку к спичечной коробке, раскрутите её вокруг руки — и модель готова. Ваша рука в ней играет роль атомного ядра, пробегающая круг за крутом спичечная коробка — роль электрона. Но чью же роль в таком случае играет нитка? Или спросим иначе: что в настоящем атоме заменяет нашу нитку, которая удерживает спичечный коробок? Ведь если нитка оборвётся, то он под действием центробежной силы улетит в сторону, без нитки наш атом существовать не может.

В настоящем атоме нет, конечно, никакой нитки, которая связывала бы ядро с электроном, и вместе с тем атом не разрушается, электрон с огромной скоростью (миллионы оборотов в секунду) вращается вокруг ядра и никуда не улетает. Что его держит? Какая сила привязывает, притягивает вращающийся электрон к ядру, не позволяет ему оторваться, улететь?

Это делает электричество.

Т-28. **Атомные частицы электрон и протон содержат мельчайшие порции электрических зарядов.** Точными опытами установлено, что любой электрон обладает некоторым отрицательным электрическим зарядом, то есть зарядом того же самого сорта, который был обнаружен у пластмассовой палочки. Можно сказать об этом ещё проще: каждый электрон обязательно содержит порцию электрических свойств — имеет электрический заряд. Электрический заряд есть обязательное, непременное свойство электрона, такое же непременное, как масса. У всех электронов электрический заряд одинаков, так же, скажем, как одинакова масса у всех пятаков.

Теперь заглянем в ядро. Если не бояться упрощений, то можно считать, что ядро состоит из крепко склеенных частиц двух сортов — нейтронов и протонов. И те и другие — довольно тяжёлые частицы, масса каждой из них почти в две тысячи раз больше массы электрона. Если предположить, что электрон весит

один грамм, как, например, маленькая канцелярская скрепка, то протон или нейтрон предстанут перед нами как двухкилограммовая гиря или двухлитровая банка, наполненная водой.

ВК-30. *До сих пор в качестве генератора (создателя) электрических сил мы использовали две натёртые палочки — стеклянную, на которой при натирании появлялся положительный электрический заряд (+), и пластмассовую с отрицательным зарядом (—). Главный недостаток такого генератора — он создаёт электрическую силу за счёт небольшого количества появившихся при натирании избыточных зарядов и практически очень быстро расходует их запас — в лучшем случае он работает несколько секунд.*

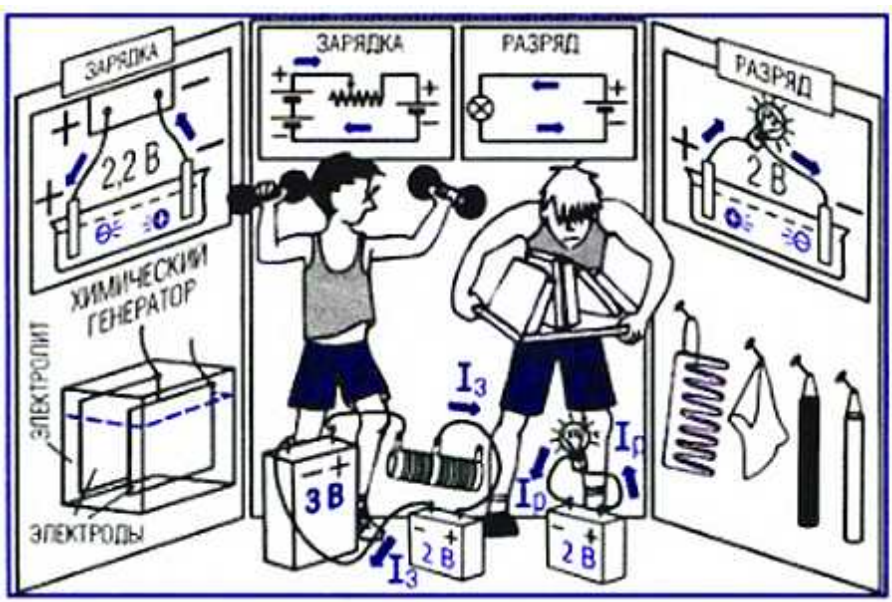
Сами же ядерные частицы — нейтрон и протон — различаются прежде всего тем, что нейтрон в электрическом отношении нейтрален (отсюда и его название), то есть никакими электрическими свойствами он не обладает, его электрический заряд равен нулю. А у протона есть положительный электрический заряд.

Подведём некоторые итоги. Электрон на орбите, протон в ядре; обе частицы от природы обладают электрическими свойствами, у электрона отрицательный электрический заряд, «минус», у протона — положительный, «плюс».

Теперь уже, наверное, понятно, почему именно электрические

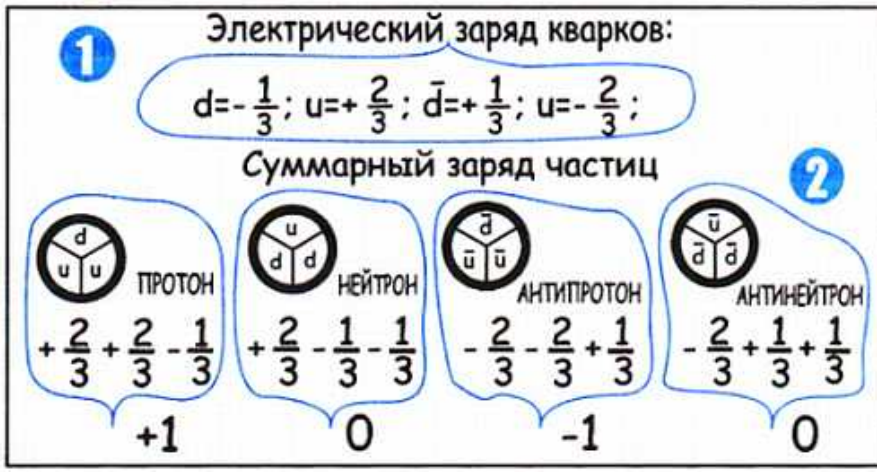
силы в настоящем атоме делают то, что в нашей модели делала нитка: притягивают к ядру вращающийся электрон, не дают ему улететь из атома под действием центробежных сил. У протонов и у электронов разноимённые электрические заряды, и силы их электрического взаимодействия стараются стянуть, сблизить эти частицы.

Ещё одна интересная особенность: у электрона и у протона заряды хотя и разного сорта (на официальном языке — разного знака, то есть «плюс» и «минус»), но эти заряды равны по величине, по своей, если можно так сказать, действующей силе. Массы у этих частиц разные — вспомните: маленькая канцелярская скрепка (электрон) и двухлитровая банка воды (протон), а вот электрические заряды, электрические свойства абсолютно одинаковые. Это тоже может быть доказано точными опытами: если на некотором расстоянии один от другого расположить два протона и на таком же расстоянии один от другого расположить два электрона, то электрические силы будут расталкивать протоны (одноимённые заряды) точно с такой же силой, с какой расталкиваются электроны (одноимённые заряды).



ВК-31. *В химическом генераторе реакции между электродами и электролитом непрерывно поставляют электроны на отрицательный электрод (—) и убирают их с положительного электрода (+). Иными словами, химическая энергия участвующих в реакциях веществ, запасённая в их структуре, непрерывно электризует электроды, поддерживает на них избыточный «плюс»*

и «минус». За счёт этого во внешней цепи непрерывно идёт ток — упорядоченное движение свободных электронов от «минуса» к «плюсу».



Р-9. ПРОТОНЫ И НЕЙТРОНЫ ИЗ КВАРКОВ. Было время, когда атом (в переводе с греческого — неделимый) считался чем-то в виде цельного микрошарика, но уже около ста лет нет никаких сомнений в том, что атом — сложная система, собранная из протонов, нейтронов и электронов. Сейчас протон и нейтрон, тоже бывшие неделимые «шарики», считают прочным соединением трёх деталей — кварков по имени **u** и **d** (от **up** — вверх и **down** — вниз). Детали эти, как и само их название «кварки», были придуманы пол века назад теоретиками, а через несколько лет в экспериментах нашли приметы их реального существования. И хотя извлечь кварки и «подержать их в руках» в принципе невозможно, уже удалось обнаружить, что у них есть не только хорошо знакомые нам свойства, такие, например, как масса и электрический заряд, но и ряд совершенно новых для физики, так сказать, чисто кварковых свойств, которым дали любопытные названия: цвет, очарование, прелесть, странность и другие в этом же роде. Кроме того, кварки требуют внести поправки в нашу оценку минимальной порции электрического заряда — он может составлять 2/3 и 1/3 от заряда электрона или протона, который в электротехнике всегда считали минимальной порцией электричества.

Кроме нормальных кварков в теории, а значит, и в

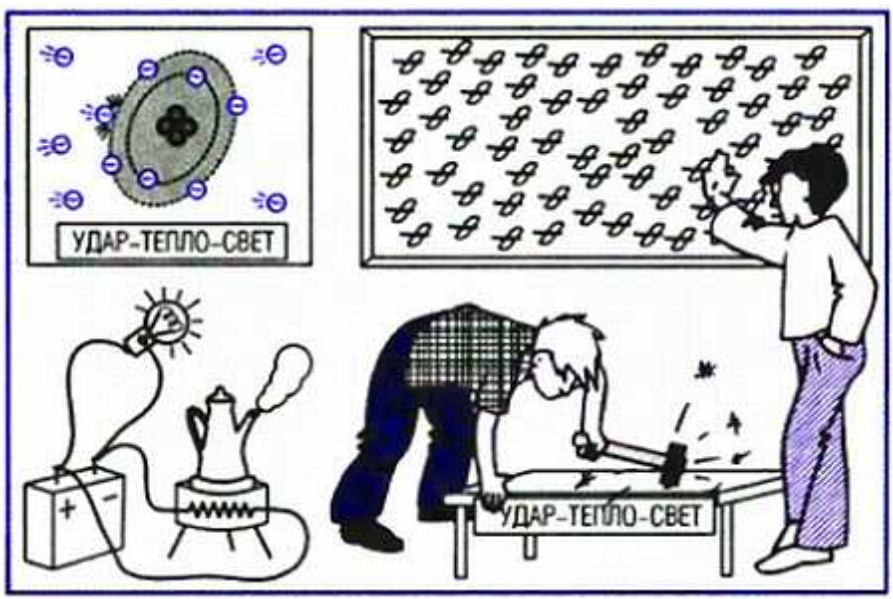
природе есть ещё и антикварки — частицы с противоположным набором некоторых свойств. Античастицы для физики явление не новое, давно известны антиэлектрон (позитрон) — электрон с положительным электрическим зарядом — и антипротон с отрицательным. Античастица живёт ничтожные доли секунды, она тотчас же соединяется с нормальной частицей, и они вместе погибают, точнее, превращаются в порцию энергии. Не будем пока говорить о других звёздных системах, но в нашей практически нет антивещества. О нём, так же как и о кварках, полезно хоть что-то знать, но чаще всего не нужно учитывать эту безумную физику, размышляя об устройстве электрических машин и приборов. Поэтому, не забывая о поправках, которые может принести нам собранный из кварков атом, мы пока будем считать протон единой частицей с минимальной порцией положительного электрического заряда, равной (по силе!!!) отрицательному заряду электрона.

Вот, оказывается, как великолепно сконструирован и изготовлен наш мир. Мало того, что получились совершенно одинаковыми все электроны во Вселенной, всё их неисчислимое множество. И все протоны получились совершенно одинаковыми. Ко всему ещё обе эти абсолютно разные частицы (бумажная скрепка и двухлитровая банка воды) имеют одинаковый по величине электрический заряд, при этом заряды у них разного сорта, разного знака. Именно такие частицы, оказывается, необходимы для образования устойчивых атомов.

Сравнительно недавно, лет 40–50 назад, начала активно развиваться и получать экспериментальное подтверждение физическая теория, согласно которой такие частицы, как протон и нейтрон (к электрону это не относится), состоят из ещё более мелких деталей — кварков (Р-9). У кварков электрический заряд меньше, чем у протона и электрона, и может составлять 1/3 или 2/3 от той порции электричества, которую имеет протон. Причём заряд кварков может быть как положительным, так и отрицательным. Однако та же теория предсказывает, что сами кварки выделить из протонов или других частиц и получить в «чистом виде» невозможно, а может быть, даже принципиально невозможно. Придравшись к этому, мы будем считать, так же как считалось до появления кварковых моделей, что положительный заряд протона и отрицательный заряд электрона — это самые

малые порции электричества, которые можно обнаружить в природе.

Т-29. **Атомы разных химических элементов различаются числом протонов в ядре.** Простейшая планетарная модель атома, построенная нами, — спичечная коробка, которая вращается вокруг руки, это модель атома водорода. В его ядре — один протон (+), а на орбите — один электрон (-). Встречаются, хотя и сравнительно редко, атомы водорода, где в ядрах вместе с протоном находятся ещё и нейтроны. Это так называемые изотопы водорода — тяжёлый водород дейтерий с одним нейтроном и сверхтяжёлый водород тритий с двумя (Р-6). Но мы пока не будем принимать во внимание нейтроны, поскольку это частицы нейтральные, электрического заряда у них нет и на электрические свойства атомов они не влияют.

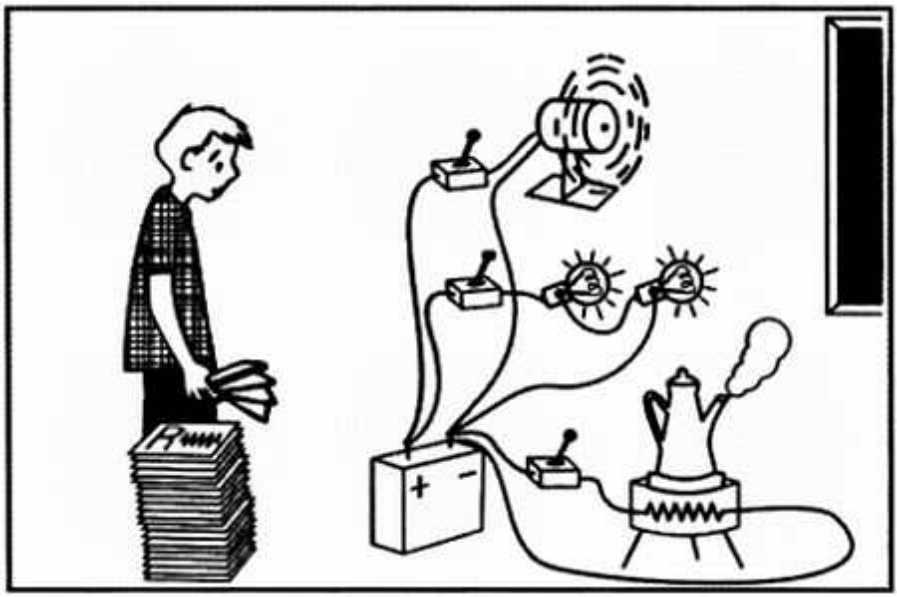


ВК-32. *Электроны, упорядоченно двигаясь в проводнике, сталкиваются с его неподвижными атомами. И при каждом таком столкновении, как при любом ударе, выделяется тепло. Одно столкновение даёт неуловимо малую порцию тепла, но в токе участвуют миллиарды электронов, и их суммарное тепловое действие может быть вполне ощутимым. Отсюда две важные специальности электричества: электрический ток создаёт тепло и, сильно нагрев проводник, заставляет его светиться — создаёт свет.*

Следующий по сложности после водорода — атом гелия. В

его ядре уже два протона (нейтроны мы пока опять-таки не принимаем во внимание, хотя они есть и у гелия, и у всех более сложных атомов), а на орбите — два электрона. У лития — три протона и три электрона, у бериллия — четыре и четыре, у бора — пять и пять, у углерода — шесть и шесть, у азота — семь и семь и так далее. И вывод: один химический элемент отличается от другого числом протонов в ядре и, соответственно, числом электронов на орбитах. Всего в природе существует 92 разных сорта сравнительно устойчивых атомов с числом протонов в ядре от 1 до 92, это и есть 92 химических элемента. С учётом искусственных, живущих очень короткое время атомов (их получают на ускорителе и тут же «взвешивают», пока они ещё живы), химических элементов, как уже говорилось, известно 118.

У разных элементов разная способность вступать в химические реакции, соединяться в молекулы. На это и обратили внимание химики ещё в те времена, когда о строении атомов ничего не было известно. Сопоставив химические свойства некоторых элементов, Дмитрий Иванович Менделеев расположил их в определённом порядке в таблице, которая всему миру известна как таблица Менделеева. А потом, спустя много лет, оказалось, что порядок следования элементов в менделеевской таблице определяется числом протонов в атомном ядре — чем больше протонов, тем более далёкое место в этой таблице занимает элемент. Более того, порядковый номер элемента в таблице точно соответствует числу протонов в ядре у атомов этого элемента. Так, элемент № 1 (водород), как уже говорилось, имеет 1 протон, элемент № 3 (литий) — 3 протона, элемент № 6 (углерод) — 6 протонов, элемент № 13 (алюминий) — 13 протонов, элемент № 47 (серебро) — 47 протонов, элемент № 79 (золото) — 79 протонов, элемент № 92 (уран) — 92 протона. Электронов в атоме, ещё раз напомним, столько же, сколько протонов.



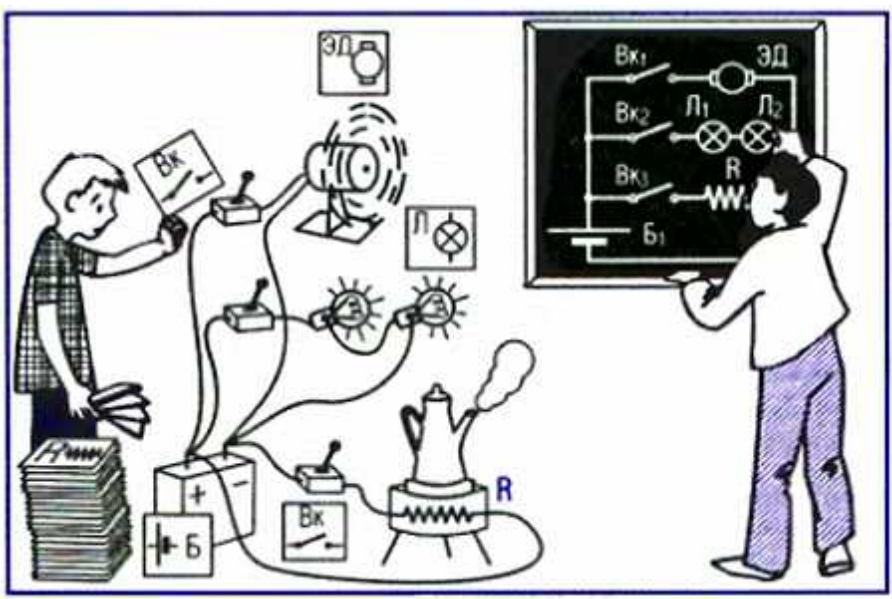
ВК-33. *Появление в 1800 году химических электрогенераторов, способных довольно долго (часы, недели) выдавать электрический ток, резко ускорило исследования электричества. Более того, это изобретение показало скептикам, что электричество может выполнять полезную работу. Такое новое для широкой публики отношение к электричеству довольно быстро превратило его из предмета, интересующего нескольких чудаков, в область серьёзного общественного внимания и явных материальных вложений.*

Электроны вращаются вокруг ядра по разным орбитам. Некоторые из орбит находятся поближе к ядру, другие — подальше от него, третьи — совсем далеко. Все электронные орбиты группируются в несколько слоёв, в несколько электронных оболочек. Очень часто на рисунках, как, например, на Р-5, любая электронная оболочка показана в виде одного круга или эллипса, по которому вращаются все её электроны. Это, конечно, грубое упрощение, одно из тех, которым было посвящено предупреждение Т-8. Признавшись в этом, мы будем всё же пользоваться упрощёнными рисунками, они легче воспринимаются и по ним легче хоть примерно представить себе то, что происходит в атоме.

Особое значение имеет внешняя электронная орбита атома (точнее говоря, наружный слой электронных орбит, Т-8), потому что именно с помощью своих внешних электронов атомы соединяются друг с другом, объединяют свои электронные оболочки, образуя молекулы. По мере увеличения порядкового

номера химического элемента число электронов на внешней орбите растёт, но их не может быть больше восьми. Поэтому количество внешних электронов периодически повторяется — 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, затем опять 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 и так далее. При этом периодически повторяются некоторые химические свойства элементов (Р-7), и сам обнаруженный Д. И. Менделеевым характер изменения этих свойств часто называют периодической системой элементов или отображением периодического закона Д. И. Менделеева.

Т-30. **Положительный ион и отрицательный ион — атомы, у которых нарушено электрическое равновесие и каких-то зарядов (+ или —) в них больше.** Обнаружив в электронах и протонах мельчайшие порции электричества, мы можем теперь объяснить, как появляются электрические свойства у более крупных «предметов» — у атомов и молекул. И у натёртых палочек из пластмассы и стекла.



ВК-34. *Завод, где работают электроны, называется «электрическая цепь». В неё входят генератор, где свободные заряды получают запас энергии, а также нагрузка, где они эту энергию отдают, и соединительные провода, по которым электроны идут на работу и с работы. Работающая цепь всегда замкнута и создаёт непрерывный путь для тока. При разрыве цепи ток прекращается. На чертеже, или, как принято говорить, на схеме электрической цепи, различные её элементы отображают условными знаками.*

Для начала напомним, что в нормальном своём состоянии любой атом электрически нейтрален. Число протонов в его ядре и число электронов на орбитах одинаково, и при этом суммарный положительный заряд атома и его суммарный отрицательный заряд как бы нейтрализуют друг друга — за пределами атома никакие его электрические свойства вообще не ощущаются. Вещество, состоящее из таких нейтральных атомов, само тоже нейтрально, электрического заряда у него нет. Поэтому стеклянная и пластмассовая палочки до того, как мы их натёрли, мелкие бумажки не притягивали.

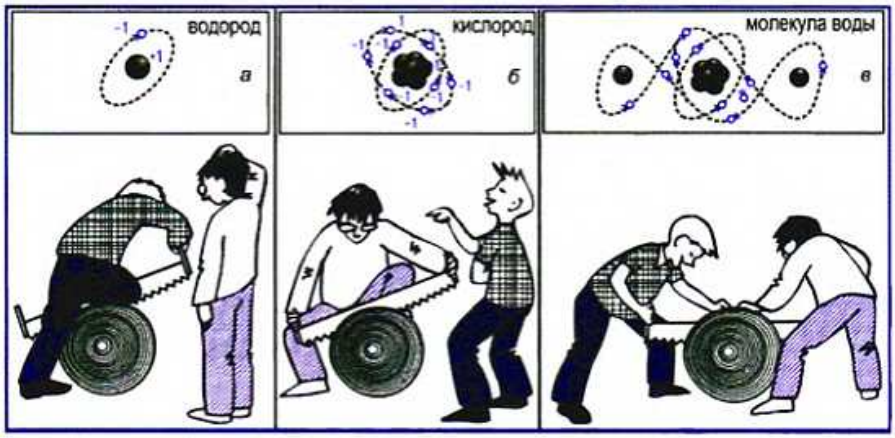
Если же каким-то способом удалить с атомной орбиты хотя бы один электрон, то общий заряд электронов атома станет меньше, чем общий заряд протонов, и такой атом в целом будет обладать положительным зарядом. А значит, будет обладать положительным зарядом и молекула, куда войдёт этот наэлектризованный атом (Р-13).

У натёртой стеклянной палочки положительный заряд появляется именно потому, что при натирании мы, грубо говоря, выдираем электроны из многих атомов, расположенных в поверхностном слое стекла. Эти электроны переходят на тряпку, которой мы натирали стеклянную палочку, а сама палочка остаётся с нехваткой электронов, то есть с положительным зарядом.

А теперь обратный процесс: можно каким-то способом втолкнуть в атом лишний электрон, у некоторых веществ ему найдётся местечко на орбите. У такого атома электронов окажется больше, чем протонов в ядре, а значит, появится отрицательный заряд. В итоге отрицательный заряд будет у молекулы, включившей в себя этот атом, и у вещества, куда входят такие наэлектризованные молекулы. Именно так можно объяснить появление отрицательного электрического заряда у натёртой пластмассовой палочки — при натирании в неё втиснулись лишние электроны, например, вырванные из тряпки, которой натирали пластмассу (Т-8).

В заключение остаётся назвать имена, которые присваивают атомам в зависимости от их электрического состояния.

Нейтральный атом — это тот, который никак не проявляет своих электрических свойств. Положительный ион — атом с недостающими электронами или, другими словами, с избытком положительного заряда. Отрицательный ион — атом с избытком электронов, то есть в итоге с отрицательным зарядом.



ВК-35. *Объединив свои внешние электронные орбиты, атомы могут создать единую устойчивую многоатомную конструкцию — молекулу. Иногда для такого «склеивания» атомов нужно затратить энергию, а иногда наоборот — энергия выделяется при соединении атомов в молекулу или при объединении небольших молекул в более крупную. Энергия выделяется, например, при горении — при соединении органических (содержащих углерод) молекул с кислородом.*

***Т-31*. Электрические силы могли бы работать в машинах.** Мы уже вспоминали о том, что люди с давних пор стремились умножить силу своих мускулов, выполнять работу большую, чем могли бы по своим природным способностям (Т-19). Стремились они к этому не просто так, не ради спортивного интереса, а для того, чтобы жить лучше, чем предначертано дикой природой. В разные времена человек приспособил себе в помощники домашних животных, энергию падающей воды, ветра, расширяющегося пара, взрывающихся бензиновых паров. Наконец настало время подумать об электричестве.

Если глубоко вникнуть в существо дела, то окажется, что даже наэлектризованные предметы могли бы выполнять значительную работу, скажем, перемещать какие-либо грузы. То, что в известных опытах с натиранием палочек могучее электричество показало себя слабым работником, объясняется очень просто: натиранием мы нарушили электрическое равновесие у чрезвычайно малого числа атомов, создали очень слабый суммарный заряд. Если в стеклянной и пластмассовой палочках «наэлектризовать» хотя бы 1 процент атомов, то, находясь на расстоянии 10 сантиметров, они притягивали бы друг друга с такой силой, которая легко сдвинула бы с места автомобиль.

И все же в использовании электрической энергии техника не пошла по пути машин, которые приводятся в движение сильно наэлектризованными деталями, некоторым подобием очень сильных магнитов. В современных электрических машинах и установках работают детали, наэлектризованные самой природой, — мельчайшие частицы вещества, с которыми мы встретились на нашей экскурсии в мир атомов и молекул. А конкретно — в современных электрических машинах всех типов работают движущиеся электроны, положительные и отрицательные ионы. Главным образом — электроны.

Глава 3
Завод, где работают электроны

В твёрдом, жидком или газообразном веществе можно создать что-то вроде электрической реки — непрерывный упорядоченный поток свободных электронов или ионов. В этом упорядоченном движении, получившем название «электрический ток», как во всяком движущемся теле, запасена определённая энергия. Поэтому электрический ток может выполнять ту или иную работу, например превращать свою энергию в теплоту или в свет. Система, где работает электрический ток, чем-то напоминает завод: в ней есть цех, где свободные электроны или ионы получают энергию, есть цех, где они её отдают, и есть транспортные пути, по которым свободные заряды перемещаются, так сказать, к месту службы. Всё это вместе получило название «электрическая цепь».

Т-32. **Многое из того, что было и ещё будет рассказано, есть большая неправда, поскольку не упоминает о существовании квантовой механики**. В предисловии отмечалось, что многое в книге излагается упрощённо и очень упрощённо (Т-8), но были и ещё будут разделы, которые кое-кто из физиков назовёт вообще неверными. И по большому счёту будет прав — некоторые связанные с электричеством картины нарисованы не так, как их представляет квантовая механика («квантум» в переводе с латыни означает «сколько»), которая вот уже несколько десятилетий открывает надёжно скрытые от нас подробности устройства мира. Взять, к примеру, принцип неопределённости — утверждение квантовой механики о том, что очень часто невозможно, причём не технически, а в принципе невозможно, с предельной точностью определить координаты электрона или иной частицы и одновременно её энергетический запас, её импульс. Как правило, можно говорить не о точных координатах, а лишь о вероятности появления частицы в какой-то точке пространства. Именно поэтому физики не пользуются понятием «орбита электрона» — нельзя для каждого момента знать одновременно местонахождение и скорость (импульс) электрона, который вращается вокруг ядра.

Электрон может вращаться на разных расстояниях от ядра и иметь поэтому разный запас энергии. Но не любой, а строго

определённый: он может, как принято говорить, находиться лишь на разрешённых законами природы строго определённых энергетических уровнях. Вращаясь со скоростью примерно 1000 километров в секунду (это представить себе невозможно — чуть ли не миллиард миллиардов оборотов в секунду!), электрон вместе с тем не излучает электромагнитные волны, хотя согласно классической физике должен излучать их. Лишь спрыгнув (Т-8) на более низкий энергетический уровень, то есть перескочив на более близкую к ядру орбиту (извините за запрещённое слово «орбита»), электрон выбрасывает строго определённую порцию энергии — квант электромагнитного излучения определённой частоты. И вот что замечательно: рассчитанные квантовой теорией для разных атомов энергетические уровни точно соответствуют излучаемой частоте, измеренной в экспериментах.

Ещё одна квантовая непривычность — частица, оказывается, это ещё и волна. Теоретически рассчитанная длина волны тем меньше, чем выше энергия частицы, что тоже в точности подтвердилось. В частности, электронный микроскоп перестаёт видеть особо мелкие детали потому, что электрон из-за своей волновой природы перекатывается через них, как морская волна перекатывается через небольшой камушек.

Глубокая, красивая и вместе с тем дерзкая квантовая теория уже многое дала практике. Например, транзисторы, лазеры и теоретически предсказанное, а затем открытое *антивещество*, в частности *позитрон* — электрон с положительным зарядом и протон с отрицательным — *антипротон*. Только квантовая теория объяснила через 45 лет после открытия такое сложное явление, как сверхпроводимость.

Но главное всё же в другом. Квантовая механика, а лучше сказать, квантовая идеология, в корне изменила наши до того незыблемые представления о природе вещей. Например, многое непрерывное стало дискретным, прерывистым, квантованным, даже гипотетические элементарные порции времени и длины стали объектом серьёзных теоретических исследований. Совершенно жёсткие, неотвратимые, казалось бы, процессы оказались вероятностными, их уже нельзя просчитать, нельзя уверенно предсказать их развитие.

ВК-36. *Настало время перейти к более серьёзному знакомству с электричеством, с его схемами, приборами, процессами. А для этого нужно научиться количественно оценивать многие уже знакомые нам электрические характеристики, так же, например, как мы привыкли количественно оценивать продукты и товары у магазинного прилавка. Вы ведь не попросите продавца взвесить вам много сахара или продать мало пакетов молока. Вы обязательно назовёте единицу измерения и цифру, которая к ней относится.*

Квантовая физика открыла удивительный и странный мир, знакомство с ним требует немалых усилий, умения поверить в то, во что поверить непросто. Много сделавший для становления квантовой физики А. Эйнштейн не мог смириться с её вероятностной природой: «Господь Бог в карты не играет». Даже профессионалы жалуются, что не могут представить себе странный квантовый мир, ищут способы как-то обмануть своё воображение.

Из-за всех этих сложностей авторы учебных и популярных книг стараются не привлекать непростые квантовые представления и всё, что возможно, обычно поясняют с простых и наглядных классических позиций. По той же причине в наших рассказах об электричестве использованы добрые старые очень упрощённые модели, ими наполнено большинство учебников, к знакомству с которыми мы готовимся. И всё же, пользуясь этими моделями, нужно хоть изредка вспоминать, что реальный мир сложнее и что квантовая физика уже многое открыла в этой

сложности.

Т-33. **Электроны и ионы могут находиться в свободном состоянии и перемещаться в межатомном пространстве**. Есть хорошая французская поговорка: «Для того чтобы сделать рагу из зайца, нужно как минимум иметь зайца». По аналогии можно сказать: для того чтобы заставить ионы и электроны работать в электрических машинах, нужно как минимум иметь эти ионы и электроны. Причём иметь их не закреплёнными в структуре вещества, а в подвижном, в совершенно свободном состоянии, чтобы можно было эти микроскопические детали перемещать, двигать и тем самым заставить их выполнять какую-то работу.

ВК-37. *Электрический заряд (обычно обозначается буквой* ***q****, или* ***Q****) электрона — мельчайшая порция отрицательного электричества, так же как заряд протона — мельчайшая порция положительного. Распространённая единица электрического заряда — кулон (сокращённо* ***К****), он равен суммарному заряду собранных вместе 6 280 000 000 000 000 000 (6,28 миллиарда миллиардов, или иначе 6,28·10[18]) электронов или протонов. Кулон очень распространённая единица, через неё приходят к единицам тока и напряжения.*

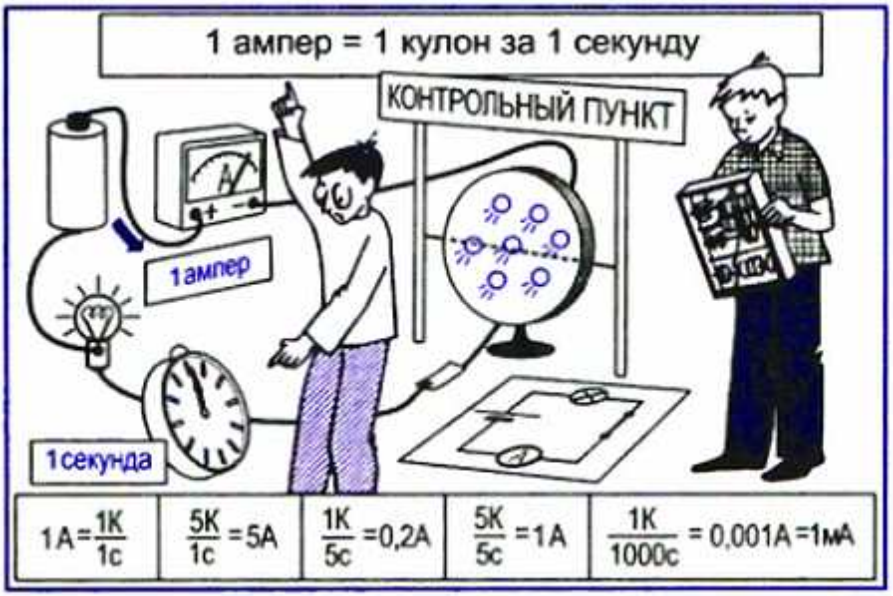
Повседневный опыт приучил нас, что твёрдые тела и жидкости имеют плотную, непрерывную структуру. А вместе с тем структура у них, если можно так сказать, ажурная, и любое вещество — вода, бумага, мрамор, сталь — больше напоминает

редкую волейбольную сетку, чем плотный клубок ниток. Мы, конечно, не можем невооружённым глазом увидеть эту ажурность, сетчатость, но точными физическими исследованиями установлено, что сгустки вещества, в частности атомные ядра и электроны, находятся друг от друга на огромном по атомным масштабам расстоянии.

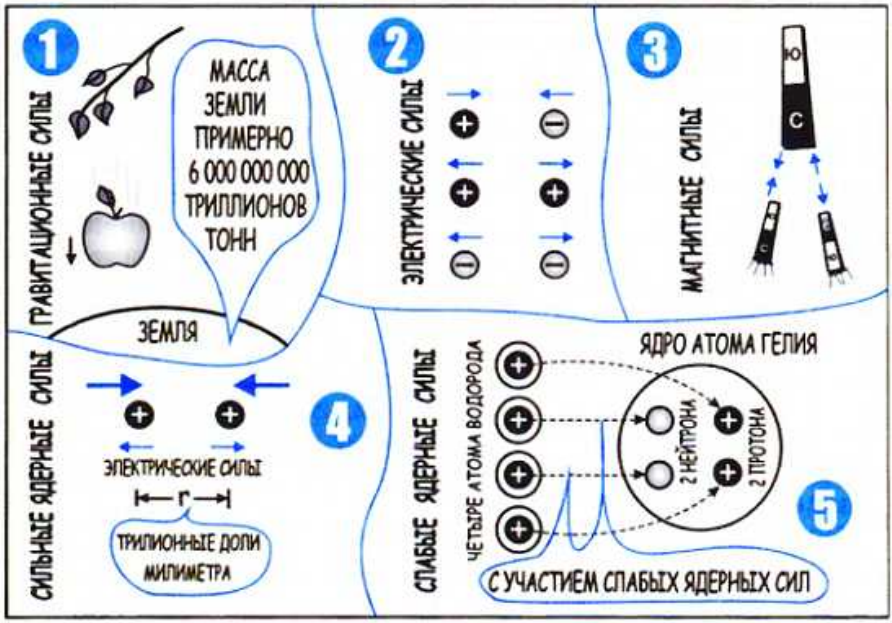
Так, если предположить, что атомное ядро имеет размеры футбольного мяча, то для соблюдения истинных пропорций нужно представить себе, как вокруг этого мяча на расстояниях в сотни и тысячи метров (!) вращаются электроны размером с горошину. А всё остальное — пустота. Ажурные атомные конструкции — вот первая особенность строения вещества, которую важно знать конструкторам электрических заводов, где будут работать электроны.

А вот вторая…

В твёрдом теле атомы как бы закреплены, связаны друг с другом в прочный каркас. В жидкостях атомы связаны слабее, могут смещаться, именно поэтому жидкость «мягкая», она легко изгибается, течёт, принимает форму сосуда. Ну а в газах у атомов вообще полная свобода — лети куда хочешь. И во всех случаях — в твёрдом теле, в жидкостях и в газах — атомы совершают какие-то небольшие движения, колеблются, пошатываются (Т-8), причём тем сильнее, чем выше температура вещества. Эти колебания и пошатывания прекращаются только при абсолютном нуле, при температуре 0 градусов по шкале Кельвина (ноль градусов Кельвина записывается так — 0 К), а это минус 273,16 градуса по шкале Цельсия. Получить такую низкую температуру пока никому не удалось, хотя подошли к ней очень близко — остались тысячные доли градуса.



ВК-38. *Чтобы количественно оценить электрический ток (обычно обозначается буквой* ***I****), существует единица измерения ампер (****А****) — это такой ток, при котором через поперечное сечение проводника за одну секунду проходит электрический заряд 1 кулон, например* $6{,}28 \cdot 10^{18}$ *электронов. Если за секунду проходит заряд в 2 кулона, то ток, естественно, в два раза интенсивней, то есть составляет 2 ампера, а если 1 кулон проходит через поперечное сечение проводника за 2 секунды, то ток составляет 0,5 ампера.*



Р-10. ПЯТЁРКА ГЛАВНЫХ СИЛ ПРИРОДЫ. Тот, кто интересовался научными дискуссиями, проходившими сорок-пятьдесят лет назад, наверняка помнит одну из их тем — «Основные силы природы». Она называла пять основных сил, полученных нашим миром при его рождении, — это силы гравитационные (1), электрические (2), магнитные (3), а также действующие только в микромире ядерные сильные силы (4) и ядерные слабые силы (5). Главными эти силы назвали потому, что всё происходящее в мире сводится к действию одной или нескольких сил из этой пятёрки.

Уже давно было известно, что электрические и магнитные силы есть нечто единое по имени электромагнетизм, что в эту группу уже нужно включить слабые ядерные силы, назвав их электрослабыми. На этом рисунке Р-10 мы сознательно повторили вольность своих коллег, предложив читателям всю пятёрку природных сил с учётом их способности действовать самостоятельно и без учёта родственных связей. Мы ещё поговорим о союзе электричества и магнетизма, на котором основана чуть ли не вся электротехника. Вспомним мы и о сильных ядерных силах, их породил так называемый барионный заряд протона и нейтрона, который начинает действовать на очень малых расстояниях. Но зато сильные силы во много раз сильнее

электрических сил и поэтому успешно противодействуют развалу атомных ядер (4) из-за расталкивания протонов с одинаковым электрическим зарядом (см. Р-2). И без ядерных слабых сил не мог бы существовать наш мир, они участвуют в превращении атомов водорода в более сложные атомы гелия (5), а этот процесс кормит энергией большинство звёзд, в том числе и наше Солнце.

При температуре выше абсолютного нуля в процессе хаотических, как их называют, тепловых колебаний атомы металлов — серебро, медь, алюминий, железо и другие — грубо говоря, сбрасывают некоторые внешние электроны, те, что сильно удалены от ядра и слабее других привязаны к нему электрическими силами. Вырвавшиеся из атомов электроны беспорядочно слоняются (Т-8) в межатомном пространстве, и эту огромную армию свободных и безработных электронов вполне можно было бы использовать в качестве движущихся деталей электрических машин.

Запомнив, что в некоторых твёрдых веществах могут быть нужные нам свободные электроны, перейдём к жидкостям и газам. Здесь в результате всё тех же тепловых колебаний атомов тоже появляются свободные электроны, но вместе с ними и другие свободные электрические частицы. Вспомните: атом, потерявший один или несколько электронов, из-за избытка протонов имеет положительный электрический заряд — это положительный ион. В твёрдых телах такие положительные ионы неподвижны, в жидкостях и особенно в газах они могут двигаться. Кроме того, в жидкостях и газах могут появиться подвижные отрицательные ионы — атомы, в которые попал лишний электрон. Таким образом, в жидкостях и газах может быть сразу три типа работающих деталей: свободные положительные ионы, свободные отрицательные ионы и, как всегда, свободные электроны (Р-14). Первое, что обычно делает электротехника, — она создаёт поток этих свободных частиц и заставляет его выполнять какую-либо полезную работу. Напомним, что организованный таким образом поток частиц получил название «электрический ток».

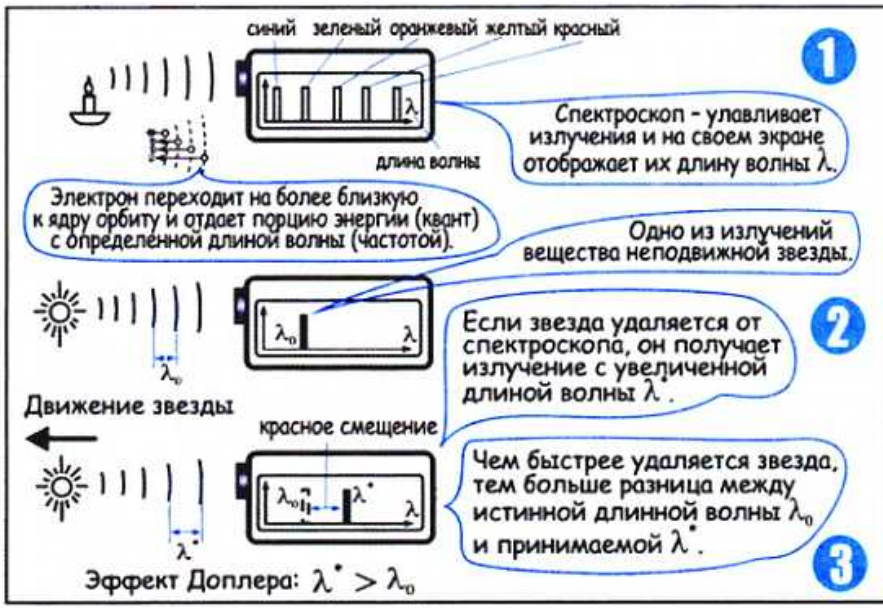
***Т-34*. Участвующие в электрическом токе электроны и (или) ионы, могут создавать тепло и свет, а также перемещать вещество.** Если бить молотом по куску железа, то оба они сильно нагреются — энергия движущегося молотка в процессе удара превращается в тепло. По той же причине быстрый поток песчинок, выбрасываемый пескоструйным

аппаратом, попав на гранитную плиту, не только очищает её, но ещё и нагревает. Поток электронов или свободных ионов в каком-либо веществе, сталкиваясь с его атомами, будет нагревать вещество — удар всегда удар. Тепловое действие, нагревание, — первая профессия движущихся зарядов (Р-16, Р-1, Р-2).

Вторая их профессия — излучение света. Если хорошо разогнать свободные заряды в веществе, то они будут ударять по неподвижным атомам с такой силой, что те начнут светиться, как, скажем, светится сильно нагретый кусок железа. Нить электрической лампочки светится именно потому, что в ней создаётся достаточно мощный поток свободных электронов и они с огромной силой ударяют по атомам металла, из которого изготовлена нить.

МАССА - везде МАССА !!!
Да здравствует вес-сила притяжения к Земле
вес (сила) - 1 ньютон
масса - 102 грамма
масса - 102 грамма
вес (сила) - 1 ньютон

ВК-39. *Мы привыкли к тому, что вес, а значит, и сила (её обычно обозначают буквой **F**) измеряются в граммах, килограммах и тоннах. Официально эти единицы используют для оценки массы в системе единиц СИ, которая принята в технике. А для оценки силы (веса) есть другая единица — ньютон (**Н**), это примерно 102 привычных грамма веса (силы), полстакана воды или молока весят примерно 1 ньютон. Иногда вес и силу указывают в килограммах, каждый из них это почти 10 ньютонов.*


синий зеленый оранжевый желтый красный
1
Спектроскоп - улавливает излучения и на своем экране отображает их длину волны λ.
длина волны
Электрон переходит на более близкую к ядру орбиту и отдает порцию энергии (квант) с определенной длиной волны (частотой).
Одно из излучений вещества неподвижной звезды.
2
Если звезда удаляется от спектроскопа, он получает излучение с увеличенной длиной волны λ*.
Движение звезды
красное смещение
Чем быстрее удаляется звезда, тем больше разница между истинной длинной волны λ0 и принимаемой λ*.
3
Эффект Доплера: λ* > λ0

Р-11. БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ — НАЧАЛО НАШЕЙ ИСТОРИИ. Примерно сто лет назад в среде физиков и астрономов началось особо активное обсуждение истории Вселенной. В значительной мере это связано с появлением новых описаний нашего мира, таких, в частности, как опубликованная в 1916 году Общая теория относительности. Глубокие размышления, смелые расчёты и, казалось бы, безупречные математические модели поначалу рисовали совершенно разные картины — от неподвижного, как бы застывшего огромного звёздного мира до мира, который родился в немыслимом взрыве и вот уже почти 15 миллиардов лет разлетается, превращаясь в атомы, пылевые облака, звёзды, галактики.

Иногда на помощь теоретическим построениям приходят результаты, так сказать, практических работ — изучения реальных астрономических характеристик, которые могут что-то рассказать о далёком прошлом Вселенной. К числу таких работ относятся опубликованные в 1929 году итоги многолетнего изучения галактик. Эту работу выполнил американский астроном Эдвин Хаббл, очень поддержав её результатами сторонников Большого взрыва. Оказалось, что все галактики как бы уходят из области, где начинался взрыв.

Движение галактик оценивалось по изменению известной длины волны (частоты) их светового излучения, которое появляется, когда электроны переходят на более близкую к ядру орбиту. Мы точно знаем появившуюся при этом частоту (длину волны) излучения, если оно создавалось в неподвижной звезде (2). Более того, заглянув в свой справочник, мы можем сказать, какое вещество создало излучение именно с этой длиной волны (частотой). Так, по спектрограмме солнечных лучей в 1868 году на Солнце был открыт химический элемент гелий, который на Земле, где гелия мало, нашли лишь через много лет.

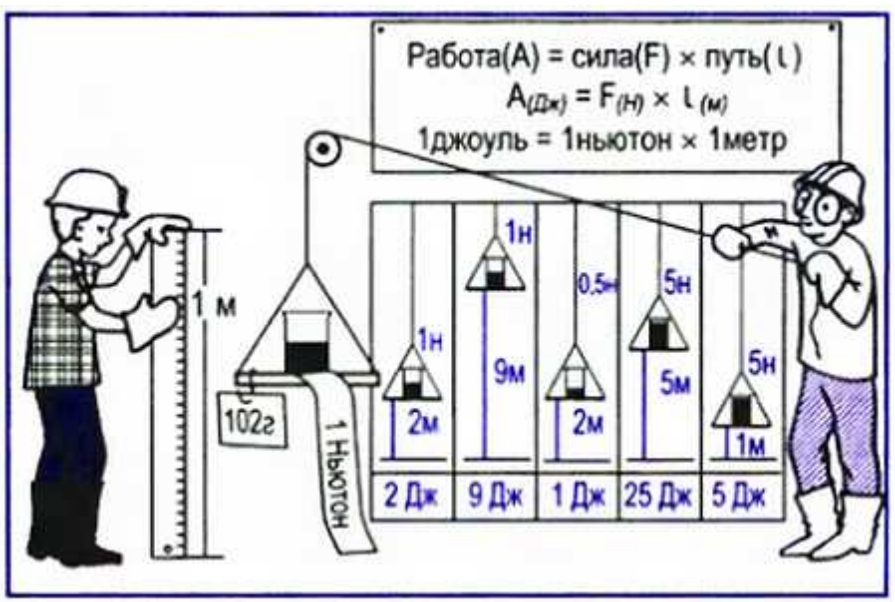
Но если излучение создаётся в веществе, которое быстро удаляется от приёмника спектроскопа (3), то принятая им волна окажется длиннее. Это явление называется эффект Доплера, оно известно широкой публике: когда поезд удаляется от нас, гудок становится более низким, более басистым, длина услышанной нами звуковой волны становится больше. На экране спектроскопа удлинение световой волны отразится так — чёрточка, соответствующая принятой волне, сдвинется вправо, в сторону более длинных волн, чаще всего в сторону красного цвета. Как принято говорить, произойдёт красное смещение.

И ещё одна профессия движущихся зарядов, в данном случае свободных ионов. Создать поток ионов — это означает создать поток вещества. Ионы ведь тоже атомы, и не страшно, если у них недостаёт одного-двух электронов или есть лишняя пара электронов. Потому что атом — это, прежде всего, ядро, недостающие электроны всегда можно где-нибудь подхватить (Т-8), а лишние сбросить. В то же время ион хотя и атом, но не обычный, не нейтральный, а всё же особый — наэлектризованный. И можно двигать ионы электрическими силами, перебрасывать из одного района в другой. Так, например, перебрасывая из растворов на поверхность какого-либо предмета ионы меди, никеля, хрома, серебра, золота, наносят на этот предмет тонкие металлические покрытия.

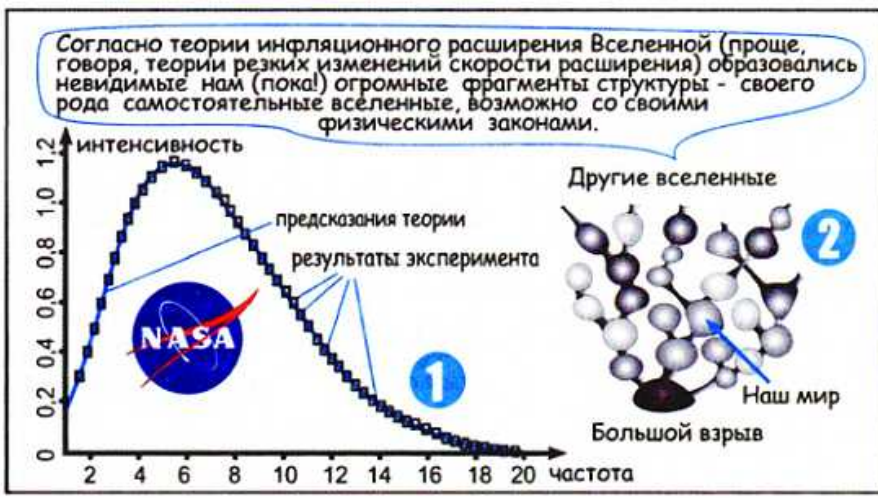
Мы пока ещё, к сожалению, не готовы к рассказу о главной профессии электрического тока, то есть упорядоченного потока свободных электронов и ионов, — с их помощью можно выполнять механическую работу, например вращать дискету, двигать диффузор громкоговорителя, тянуть электропоезда. Но

даже уже известные нам профессии движущихся зарядов — производство тепла, света, транспорт вещества — стоят того, чтобы подробнее познакомиться с машинами и установками, где эти движущиеся заряды работают.

Т-35. **Проводники, полупроводники, изоляторы — вещества с различным содержанием свободных электрических зарядов.** Не во всяком веществе есть свободные электрические заряды в заметном количестве, а там, где они есть, их количество зависит от многих факторов. Например, от чистоты вещества: бывает, что небольшая добавка, небольшая доля примеси очень способствует появлению свободных зарядов. У некоторых веществ число свободных электронов можно значительно увеличить, если облучать эти вещества светом, — свет просто выбивает электроны из атомов. У других веществ такой же эффект наблюдается под действием рентгеновского излучения. Количество свободных зарядов зависит также от температуры — чем она выше, тем интенсивнее собственные тепловые колебания атомов и молекул, тем больше слетает с них электронов (Т-8). И, конечно же, число свободных зарядов в веществе прежде всего зависит от того, какое это вещество, насколько крепко в его атомах внешние электроны привязаны к ядру, насколько легко им вырваться на свободу. И ещё от того, насколько велики атомы, насколько близко один к другому они расположены и долго ли сможет свободный электрон бродить в межатомном пространстве, не подвергаясь опасности наткнуться на свободное место в атоме и вновь очутиться на орбите (Т-8).



ВК-40. *Работу (обычно обозначается буквой **А**) в механике принято оценивать как силу, действовавшую на определённом участке пути. Единица работы — джоуль (**Дж**). Он соответствует работе, которую совершит сила в 1 ньютон, действующая на пути в 1 метр. Джоуль можно представить себе как работу, которая выполняется при поднятии полстакана молока на высоту одного метра. В джоулях измеряется также энергия, где-либо запасённая или затраченная на выполнение определённой работы.*


Согласно теории инфляционного расширения Вселенной (проще, говоря, теории резких изменений скорости расширения) образовались невидимые нам (пока!) огромные фрагменты структуры - своего рода самостоятельные вселенные, возможно со своими физическими законами.
интенсивность
0 0,2 0,4 0,6 0,8 1,0 1,2
предсказания теории
результаты эксперимента
NASA
1
2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 частота
Другие вселенные
2
Наш мир
Большой взрыв

Р-12. НО, МОЖЕТ БЫТЬ, ГДЕ-ТО ЧТО-ТО ВЫШЛО ИНАЧЕ. Другой пример (первый см. Р-11) такой рабочей находки — реликтовое, то есть древнейшее, радиоизлучение, оставшееся во Вселенной со времён Большого взрыва. Это излучение в 1968 году обнаружили американские астрофизики Арно Пензиас и Роберт Вильсон, занимаясь подготовкой антенны в установке для связи с космическими аппаратами. Находка решительно подтвердила созданную теоретиками картину Большого взрыва, в котором с самого начала участвовала сверхплотная и сверхгорячая материя. Из неё через много тысячелетий сформировались некоторые привычные для нас теперь атомы, а ещё позже — сгустки газа и звёзды, в том числе наше Солнце.

Обнаруженное на Земле реликтовое излучение вдохновило американских и европейских космических специалистов на создание спутников для его

исследования в открытом космосе, свободном от земных помех. В 2006 году начали публиковаться интересные результаты проведённых измерений. В их числе, например, данные о некоторых изменениях уровня реликтового излучения в разных точках небосвода, а также данные, с высокой точностью подтвердившие важные элементы теории Большого взрыва (**1**).

Результатами последних исследований реликтового излучения пытаются поддержать теорию инфляционного (от латинского слова «инфлатио» — «вздутие») расширения нашего мира. Она полагает, что после Большого взрыва наша Вселенная расширялась с разной скоростью. Во времена особо быстрого расширения она создавала связанные с нашей Вселенной, но уже самостоятельно живущие её части (**2**) — вселенные, в которых могут идти совершенно другие процессы и действовать иные физические законы.

Все вещества принято делить на три основные группы: проводники, полупроводники и диэлектрики, которые иногда называют изоляторами.

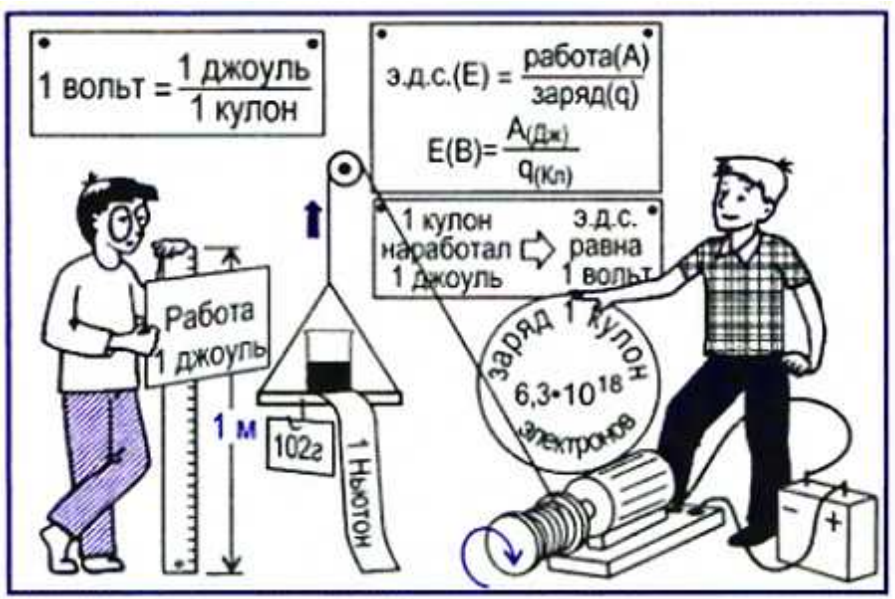
О проводниках мы уже говорили — это, прежде всего, металлы, в их атомах внешние электроны связаны с ядром очень слабо, и почти каждый атом превратился в положительный ион, выпустил в межатомное пространство один или даже несколько электронов. В металлах так много свободных электронов, что по отношению к ним применяют выражения «электронный газ» или «электронная пыль». Проводниками могут быть жидкости и газы. «Могут быть» в данном случае нужно понимать так: количество свободных зарядов в жидкости (или в газе) зависит от того, какие вещества в ней растворены, какие химические процессы происходят. Например, в дистиллированной воде свободных зарядов чрезвычайно мало, практически можно считать, что их нет вообще. Но стоит бросить в дистиллированную воду щепотку соли, как вода становится проводником — соль растворяется, образует в воде большое количество свободных положительных и отрицательных ионов. При определённых условиях хорошими проводниками становятся некоторые газы, в этом можно убедиться, взглянув на горящую лампу дневного света (Т-177).

В диэлектриках (изоляторах) все электроны крепко связаны с ядром, и редко какой-то из них может вырваться на свободу. Нужно пересмотреть миллиарды атомов диэлектрика, чтобы отыскать среди них один положительный ион — атом,

упустивший свой электрон в межатомное пространство.

О полупроводниках говорит само их название — свободных зарядов в них значительно больше, чем в диэлектриках, но значительно меньше, чем в проводниках, например в металлах. Кроме того, у полупроводников есть особенности, которые сделали их основой всей современной электроники. В любом компьютере, сотовом телефоне, телевизоре работают тысячи и даже миллионы полупроводниковых приборов, скрытых в пластмассовых корпусах. Полупроводниковые приборы широко используются и в электрических машинах, во многих системах большой энергетики.

До сих пор все свои электрические опыты мы проводили с изоляторами: со стеклом, пластмассой, пенопластом. Но если мы хотим получить от электричества ощутимую работу, то нужно переходить от изоляторов к проводникам, где свободных зарядов много и можно создать достаточно мощный их поток, — полноводная река работает лучше, чем тонкая струйка воды из водопроводного крана.



ВК-41. *Важная характеристика электрогенератора — его электродвижущая сила, сокращённо э.д.с. (обычно обозначается буквой* ***E****), его способность выполнять работу, перемещая заряды по электрической цепи. Единица э.д.с. — вольт (****В****), такую э.д.с. имеет генератор, который, переместив по внешней цепи заряд 1 кулон, выполняет работу 1 джоуль. Если каждый кулон выполняет работу 2 джоуля, то, значит, генератор проталкивает этот*

кулон по цепи с вдвое большей силой и э.д.с. равна 2 вольта.

Т-36. **Генератор и нагрузка — основные элементы электрической цепи.** Система, где работают свободные электроны или ионы, получила название «электрическая цепь». Слово «цепь» в этом названии появилось, скорее всего, потому, что заряды, как правило, последовательно, поочередно проходят по нескольким участкам, как бы по звеньям цепочки.

Из возможных трёх разновидностей свободных зарядов (электроны, положительные и отрицательные ионы) мы пока поговорим только об электронах — это основные работники, именно они в основном и трудятся в электрических машинах, аппаратах, системах.

Какой бы сложной ни была электрическая цепь, в ней обязательно есть два основных участка, два главных цеха. В одном из них свободные заряды получают энергию — это генератор. На другом участке, в другом главном цехе, заряды отдают полученную энергию. Этот цех называют нагрузкой: он нагружает генератор, отбирает у него энергию, использует её для выполнения полезной работы. Типичная нагрузка — электрическая лампочка, именно в её металлической нити свободные электроны, которые генератор заставил двигаться, сталкиваются с местными атомами, ударяют по ним, и в результате этих ударов выделяется тепло и свет. Напоминаем: выделение тепла при ударе движущегося электрона в неподвижный атом — это сильное упрощение. Истинную сложную картину этого процесса знает квантовая механика.

Работа $A_{(Дж)}$ = сила(вес)$F_{(Н)}$ × путь $l_{(м)}$
Мощность $P_{(Вт)}$ = работа $A_{(Дж)}$ / время $t_{(с)}$
1 ватт = 1 джоуль / 1 секунда
5Н
1Н
5 Дж / 1с = 5 Вт
1 Дж / 5с = 0,2 Вт
1 метр
t = 1 секунда
t = 5 секунд
1 метр

ВК-42. *Часто важно знать, не только какая работа выполнена, но и сколько на это ушло времени, — одно дело, если забор покрашен за час, и совсем другое дело, если за полгода. О том, насколько интенсивно выполняется работа, говорит мощность (обычно обозначается буквой* ***P****). Единица мощности — ватт (****Вт****) соответствует работе в 1 джоуль, сделанной за 1 секунду. Если эта работа была выполнена за 0,1 секунды, то мощность равна 10 ватт, а если за 5 секунд, то работа велась более вяло — с мощностью 0,2 ватта.*

Генератор и нагрузка входят не только в электрическую, но и в любую другую схему использования энергии, в любое устройство, предназначенное для выполнения каких-либо работ. Возьмём, к примеру, водяную мельницу. Могучие силы природы — Солнце и ветер — испаряют воду с поверхности земли, собирают её в прекрасные белые облака и в виде дождя и снега выплёскивают обратно на землю, в том числе на горные вершины. С гор вода течёт вниз, сливается в русла быстрых рек. Так работает генератор, с помощью гравитационных сил он создаёт потоки воды (она, заметьте, в реках двигается сверху вниз и никогда наоборот), снабжает их энергией. Падающая вода вращает колесо с лопастями, оно приводит в движение жернова мельницы, выполняющие нужную работу — перемалывание зерна. Это — нагрузка.

Т-37. **Натёртые пластмассовая и стеклянная палочки в роли генератора, металлический проводник — в роли**

нагрузки. Две наэлектризованные палочки — стеклянная (+) и пластмассовая (-) — и вот уже готов простейший генератор, который мог бы двигать свободные электрические заряды, заставляя их работать. Стоит только соединить палочки проводником, как в нём сразу же начнётся электрический ток, о котором мы уже мимоходом вспоминали (Т-33). Старинное слово «ток» означает «непрерывное течение» и происходит от того же корня, что и поток. В формулах, на схемах, в технических текстах электрический ток обозначается буквой *I*, в некоторых случаях — буквой *i*. В нашем примере электрический ток — это упорядоченное движение свободных электронов в проводнике с пластмассовой палочки (-), где их слишком много, на стеклянную палочку (+), где электронов не хватает. Можно сказать об этом подробнее: «минус» пластмассовой палочки вталкивает свои лишние электроны в проводник. В том его участке, который примыкает к этой пластмассовой палочке, тоже появляется избыточный «минус»; он двигает свободные электроны всё дальше и дальше к «плюсу», к стеклянной палочке, где электроны занимают свободные места в тамошних атомах (Т-8). Проводник в этой системе играет роль нагрузки — проходя по нему, заряды (электрический ток *I*) работают, вырабатывают какое-то количество тепла. А это значит, что наша цель достигнута, завод, где работают движущиеся заряды, построен.

ВК-43. *Существуют сравнительно простые электроизмерительные приборы — для измерения тока амперметр*

и для измерения электродвижущей силы вольтметр. Вольтметр подключается параллельно выходным зажимам генератора, у которого нужно измерить Э.Д.С., а амперметр включается последовательно в цепь, в которой нужно измерить ток. При включении амперметра и вольтметра нужно соблюдать правильную полярность — не перепутать местами + и —, они указаны на входных контактах приборов.

1
НЕКОТОРЫЕ НЕЙТРАЛЬНЫЕ АТОМЫ ВЕЩЕСТВА ТЕРЯЮТ ЭЛЕКТРОНЫ И ПРЕВРАЩАЮТСЯ В ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ ИОНЫ (СТЕКЛО). В ДРУГОМ - В ВЕЩЕСТВО "ВТАЛКИВАЮТСЯ" ЛИШНИЕ ЭЛЕКТРОНЫ (ПЛАСТМАССА).
+
СТЕКЛО
—
ПЛАСТМАССА
ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД
НЕЙТРАЛЬНЫЕ АТОМЫ
ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ ИОНЫ
ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ИОНЫ
ЯДРА
ЭЛЕКТРОНОВ
АТОМОВ
+1 +6 +12 +1 +6 +12 +1 +6 +12
-1 -6 -12 0 -4 -8 -2 -10 -15
0 0 0 +1 +2 +4 -1 -2 -3

Р-13. У НАС ТОЖЕ ВОЗМОЖНЫ ВАРИАНТЫ… Таблица на этом рисунке поясняет, какие в принципе возможны изменения, в результате которых у какого-либо физического тела начнёт показывать себя электрический заряд, как мы это наблюдали при натирании стекла и пластмассы. В первых трёх столбцах таблицы показаны 3 атома (атом водорода и два условных атома с разным числом протонов в ядре) в идеальном состоянии — в каждом из них равно число положительных (+) и отрицательных (—) зарядов. Вещество, созданное из таких атомов, никаких электрических свойств не проявляет. В следующей тройке колонок у атомов связь внешних электронов с ядром слабее, и часть появившихся свободных электронов удаётся удалить из вещества, как это происходило при натирании стекла. У вещества, о котором рассказывают три последних столбца таблицы, атомы сумели где-то добыть и присоединить к себе несколько лишних электронов, и общий электрический заряд вещества оказался отрицательным, как это было при натирании пластмассы.

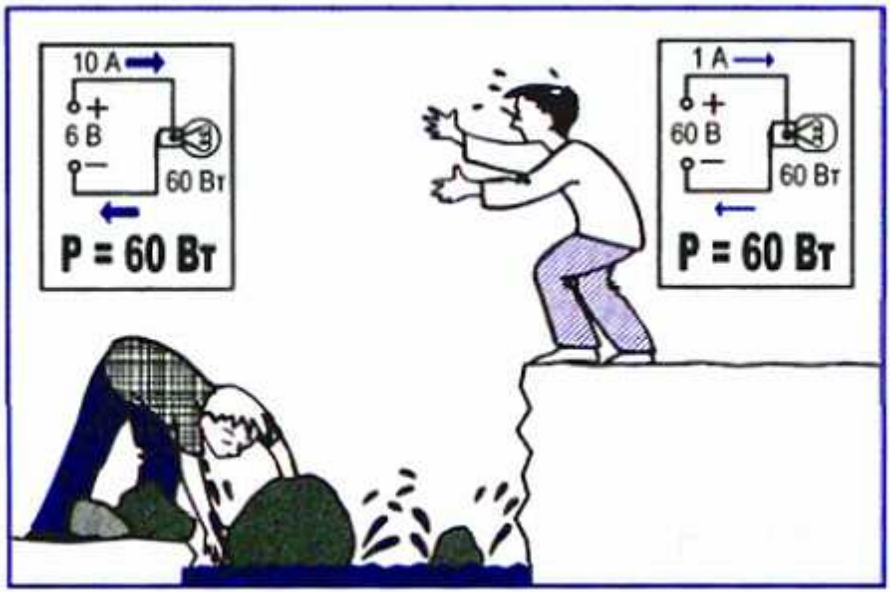
Прежде чем двигаться дальше — два предупреждения. Во-первых, экспериментируя с наэлектризованными палочками и проводником, мы ввели важнейшее для всей электротехники понятие «электрический ток», сказав о нём буквально несколько слов. Но это лишь самое предварительное сообщение о токе, очень скоро о нём будет рассказано подробно. Во-вторых, экспериментируя с наэлектризованными палочками и проводником, хорошо бы какими-нибудь цифрами оценить работу нашей учебной электрической цепи. Много ли она получает энергии? Много ли выдаёт тепла? От чего всё это зависит? По каким показателям можно оценить то, что происходит в цепи? Как определить работоспособность свободных электронов? Как оценить массовость их движения в проводнике? Ответить на подобные вопросы не очень трудно, это непременно будет сделано, и тоже очень скоро, буквально через несколько страниц (Т-43). Значительно сложнее ответить на другой вопрос, просто смешной, на первый взгляд: как технически избыточные заряды создают электрический ток? Каким способом один электрический заряд толкает второй заряд? Может быть, просто прижимается к нему и толкает, как, скажем, напористый хоккеист плечом толкает своего соперника?

Т-38. **Наряду с веществом существует и такой вид материи, как поле.** Во всём нашем рассказе об электричестве этот небольшой раздел — один из самых сложных, в значительной степени из-за него пришлось начинать издалека. С того, что человек нелегко и непросто постигал устройство мира. Что мир устроен намного сложнее, чем кажется с первого взгляда. И что нужно уметь считаться с реальностью, какой бы непривычной она ни казалась. Нужно научиться признавать очевидные факты, ограждать себя от неверия и внутренних протестов спокойной формулой «Так устроен этот мир…».

Мы, к сожалению, не видим, как лишние электроны пластмассовой палочки (-) подталкивают свободные электроны проводника, — плечом или как-то иначе (Т-8). Но мы прекрасно видели, как натёртая палочка с довольно большого расстояния подтягивала клочки бумаги (Р-1, Р-17). Каким образом? С помощью каких нитей? Через каких посредников? Не может же палочка действовать на бумажки через Ничто, обязательно должно существовать какое-то Нечто, с помощью которого один заряд тянет к себе другой.

Проще всего было бы предположить, что заряды как-то взаимодействуют через вещество, которое находится между ними, в нашем примере с притягиванием бумажек — через воздух. Например, заряды тянут или толкают друг друга через молекулы,

атомы, электроны или ещё какие-нибудь частицы вещества, подобно тому, как паровоз через весь состав передаёт свою тягу последнему вагону. Но достаточно перенести эксперимент в безвоздушное пространство, в вакуум, и эта гипотеза безнадёжно отпадает — в вакууме, в пустоте, где никакого промежуточного вещества нет, палочка притягивает клочки бумаги с такой же силой, как и в воздухе. А это значит…



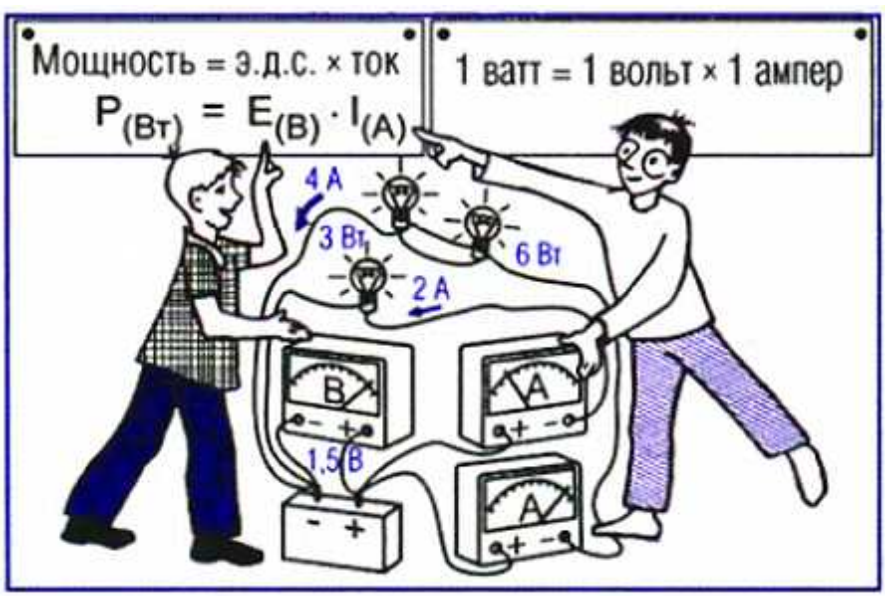
ВК-44. *Сила тока **I** в амперах — это количество кулонов, которое за секунду проходит через поперечное сечение проводника. А электродвижущая сила **E** в вольтах — это работа, которую выполняет каждый кулон. Значит, мощность **P** в ваттах (работа за секунду) в какой-либо цепи можно подсчитать как произведение э.д.с. в вольтах (работа одного кулона) на ток в амперах (число кулонов в секунду). То есть мощность можно подсчитать по достаточно простой формуле **P** (в ваттах) = **E** (в вольтах) x **I** (в амперах).*

А это значит, что в мире есть ещё что-то, кроме реальности «вещество», к которому мы привыкали миллионы лет и вроде бы знаем все его свойства и повадки: массу, объём, геометрические формы, гравитационное притяжение, движение по инерции, плотность, температуру. Вещество, считаем мы, — это то, что реально есть, то, что мы видим и, образно говоря, можем взять в руки. Вещество — это глина, вода, воздух, плитка шоколада, марсианские пески, лепесток ромашки. Нам кажется, всё, что есть

в мире, — это вещество.

Но вспомните ещё раз (это полезно вспоминать почаще): мир устроен сложней, чем кажется с первого взгляда. Силой мысли, своей неутомимой пытливостью, своей любознательностью человек открыл и понял то, что природа не показала ему сразу. Он открыл невидимое электричество: нажмите кнопку выключателя на настольной лампе — и станет ясно, что электричество есть абсолютная реальность и мы, люди, научили его работать на нас. Человек открыл ядерные силы: вспомните десятки атомных электростанций — и у вас исчезнут сомнения относительно реальности ядерных сил. Теперь настал момент увидеть, понять и привыкнуть вот к чему — кроме вещества, кроме этой привычной и очень наглядной реальности есть ещё иная, невидимая, без цвета, вкуса, запаха, размазанная по пространству реальность, которой не заготовлено место в нашем сознании. Этой реальности дано название «поле».

Поля бывают разные, разных, если можно так сказать, сортов. Вокруг электрического заряда существует электрическое поле, вокруг магнитов, с которыми мы начнём подробно знакомиться очень скоро, существуют магнитные поля, каждую массу — протон, яблоко, планету — окружает гравитационное поле. И именно через поля происходят все взаимодействия на расстоянии: взаимное притяжение масс, взаимодействие магнитов, притяжение или отталкивание электрических зарядов.



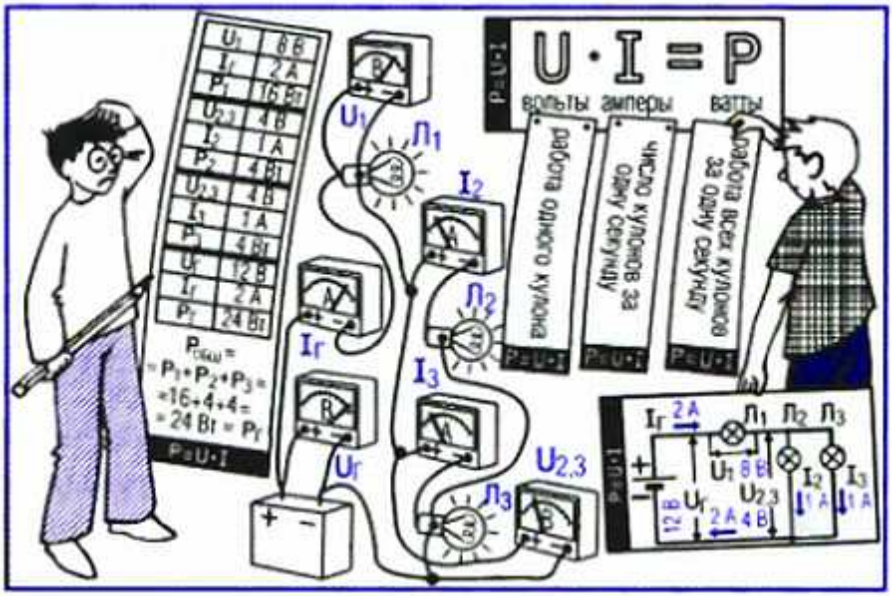
ВК-45. *На этой схеме две параллельные цепи, в нижней одна*

*лампочка, в верхней две, включённые параллельно. Благодаря этому параллельному соединению сопротивление верхней цепи в два раза меньше, чем нижней, ток при этом в два раза больше (4 А) и потребляемая мощность тоже (6 Вт). Проделав несколько мысленных опытов и на этой схеме, можно получить вывод, который можно было сделать на предыдущей: одну и ту же мощность можно получить при разных соотношениях тока **I** и напряжения **U**.*

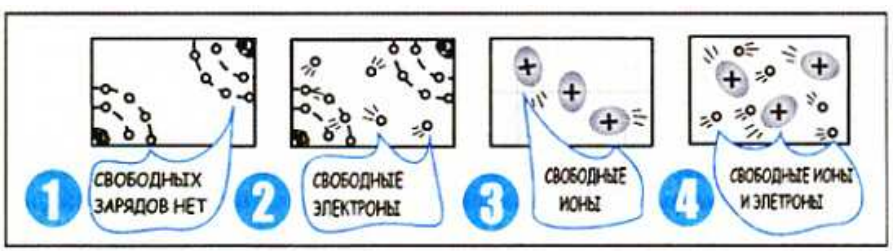
Т-39. **Тот, кто хочет чувствовать себя свободно в электрическом королевстве, непременно должен научиться дополнять открывшуюся ему простую картину мира**. Сейчас уместно ещё раз вспомнить о древнейших изобретателях, которые придумали разговорный язык. И о том, что после этого много тысячелетий люди присваивали своим открытиям названия-слова, как бы вешали на эти открытия таблички: «отражение света», «молекула», «маятник», «кровеносные сосуды», «кинетическая энергия» и многие тысячи других. Иногда это было несложно — увидел с мелкими блёстками серый камень — и присвоил ему название «гранит», увидел пушистого зверька, прыгающего по деревьям, — и назвал его «белка».

Но бывало, в простом деле привешивания табличек встречались серьёзные трудности. Что такое, например, сила? Энциклопедический словарь поясняет: это «…мера механического действия на данное материальное тело со стороны других тел… как при непосредственном их контакте, так и через посредство создаваемых телами полей». Чётко сказано, но как представить себе силу столь же просто, как белку или кусок гранита? Как она выглядит, эта сила? Как её увидеть хотя бы мысленным взором? Как она действует? Откуда берётся?

Кто-то пошутил: попытки объяснить, что такое сила, свидетельствуют о бессилии человечества. Но эта шутка, к сожалению, отражает существо дела, как говорится, с точностью до наоборот. Мозг наш действительно не может сразу, с ходу понимать какие-то реальности — так мы устроены. А божья коровка устроена так, что не может понять



ВК-46. *Та же зависимость и та же формула* $P = E \cdot I$, *но только вместо э.д.с.* E *в ней напряжение* U — *часть э.д.с., доставшаяся участку цепи, о чём мы ещё поговорим подробно (ВК-56, ВК-57). Напряжение, как и э.д.с., измеряется в вольтах, и поэтому мощность, потребляемая каким-либо участком цепи, так же просто, как и в предыдущем случае, вычисляем по формуле* $P = U \cdot I$, *где* P, U, I *относятся к выбранному участку. При желании к этой сложной схеме можно вернуться после знакомства с разделами ВК, названными выше.*



Р-14. АТОМЫ-НАРУШИТЕЛИ — НАХОДКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ. Из всех показанных на предыдущем рисунке (Р-13) возможных нарушений некоторые довольно часто встречаются в природных веществах. И многие такие вещества-нарушители оказались находкой для электротехники — она получила от природы в готовом виде необходимые ей материалы, помогающие

добывать и использовать электрическую энергию. Большое количество свободных электронов в межатомном пространстве (2) характерно для металлов (цинк, олово, железо, серебро, золото и другие). Очень много свободных электронов в меди и алюминии, их к тому же сравнительно недорого добывать и обрабатывать. Сочетание этих достоинств сделало медь и алюминий самыми популярными материалами электротехники.

В металлах и иных твёрдых веществах положительные ионы (оставшиеся после ухода некоторых внешних электронов в межатомное пространство) неподвижны — они как бы привязаны к жёсткой структуре материала, например к его кристаллической решётке (3). Но в жидкостях или в газах возможно не только появление свободных электронов, сбежавших из своих атомов, но и самих этих атомов (точнее говоря, положительных ионов) в свободном состоянии — теперь они уже не связаны с какой-либо жёсткой структурой и могут свободно перемещаться в пространстве (4).

В заключение ещё один вариант состояния вещества, показанный первым на этом рисунке Р-14.1 и на предыдущем Р-13.1. Здесь представлены атомы, у которых все электроны прочно связаны с ядром и находятся на своих орбитах, в итоге свободных зарядов вообще нет. Такие вещества тоже нужны электротехнике, скоро вы увидите, когда и почему.

Пятую симфонию Бетховена и выучить таблицу умножения. Что поделаешь — такими мы с ней получились у природы. И давайте не будем из-за этого горевать, давайте радоваться тому, что человек не смирился, что он научился силой мысли видеть, понимать и практически использовать то, что казалось спрятанным от него навсегда. Сталкиваясь с необъяснимым, он чаще всего действовал по довольно простому правилу: на опыте убедись, что Это есть, определи основные свойства Этого, привесь табличку, то есть дай Этому название и привыкай к мысли, что ты теперь знаешь Нечто Такое, чего не знали твои предки.

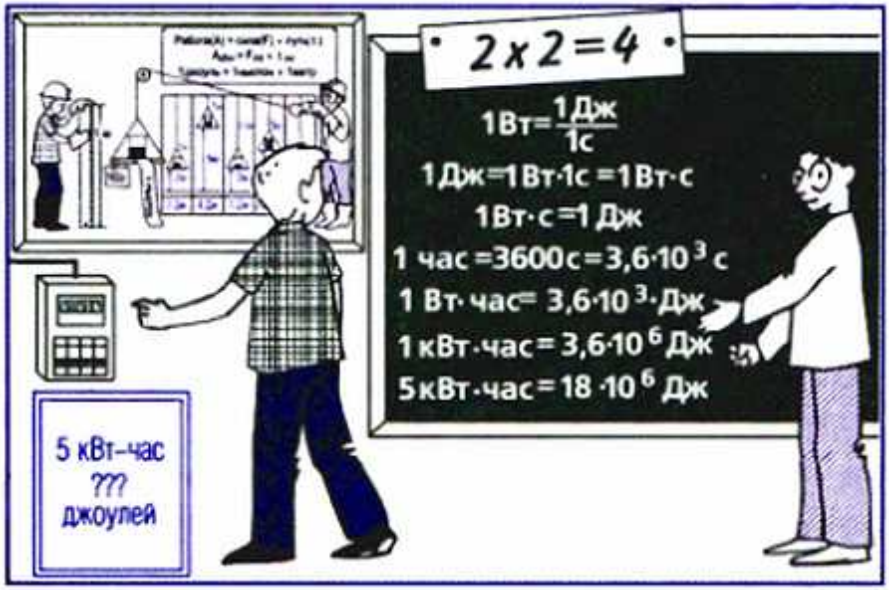
Таким же способом мы можем совершенно спокойно ввести разного рода поля в свою картину мира. Поле — это никак не вещество, а иная, невидимая, особая форма материи или, как ещё говорят, особое состояние пространства, в котором действуют те

или иные физические силы: электрические, магнитные, гравитационные, ядерные, слабые. Все соответствующие этому списку поля обнаружены в экспериментах, у них своё место в физических теориях, они детально изучены и широко используются в огромном количестве машин и технологий. Коротко говоря, поля есть, они не выдумка, это Нечто мы признаём и, как говорится, включаем в свою картину мира.

Кстати, о невидимости полей. Электрические и магнитные поля, вернее их объединение, это единственное, что действительно видит человек. Потому что свет есть не что иное, как электромагнитные волны, быстроменяющиеся электрические и магнитные поля. Их излучают или отражают окружающие нас предметы, эти волны попадают в глаз, и только поэтому мы видим то, что видим: свечу, книгу, луну, пирожок на тарелке, летящий самолёт. Более того, в световой волне электрические и магнитные поля уже не связаны с породившим их электрическим зарядом, они оторвались от него и совершенно свободны, живут своей жизнью (Т-8) — мы видим электрические и магнитные поля, так сказать, в чистом виде. И наконец ещё один, совсем уже нокаутирующий факт — физики предсказали, а затем и в эксперименте увидели, как порция (квант) электромагнитного поля превращается в пару электронов, то есть реальность «Поле» превращается в реальность «Вещество».

Каждый, конечно, может и дальше поразмышлять об электрическом, магнитном или гравитационном поле, о других непонятностях, а лучше сказать — непривычностях. У нас же, к сожалению, сейчас нет времени на эти приятные размышления — у нас впереди ещё большой путь в науку об электричестве, и мы должны продвигаться вперед.

Т-40. **Уже древние греки, продолжив свои опыты, могли бы создать в проводнике электрический ток — упорядоченное движение электронов.** Выяснив, что электрический заряд воздействует на другой заряд не плечом (Т-8), а электрическим полем, мы можем спокойно вернуться к своему экспериментальному генератору — к натёртым, то есть наэлектризованным стеклянной (+) и пластмассовой (-) палочкам. Вспомните, как только мы соединили эти палочки металлическим проводником (нагрузка), в проводнике сразу же началось упорядоченное движение свободных электронов. Слово «упорядоченное» нужно особо подчеркнуть — речь идёт не просто о движении электронов, а о том движении, которое возникает под действием внешних электрических сил, под действием электрических полей, в данном случае полей, созданных наэлектризованными палочками.



ВК-47. *Если генератор мощностью 1 ватт работал 1 секунду, то он выполнил работу 1 джоуль. Иными словами, 1 джоуль = 1 ватт х 1 секунду = 1 ватт-секунда.*

Иногда именно в этих ватт-секундах (Вт·с), а не в джоулях (Дж) удобней измерять выполненную электричеством работу. Её измеряют и в более крупных единицах — в киловатт·часах (кВт·час). Поскольку 1 час = 3600 секунд и 1 киловатт = 1000 ватт, то каждый киловатт-час — это 3 600 000 джоулей.

Р-15. ГЛАВНЫЙ РАБОТНИК — ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. Первые исследователи электричества, натирая крупные предметы из смолы, стекла или иных материалов, возможно, надеялись перемещать эти крупные предметы электрическими силами и таким

образом выполнять большую работу, помогая человеку. Но техника пошла иным путём, и главным работником в электрических машинах и приборах стали невидимо мелкие детали — движущиеся свободные электроны и ионы. Двигают их, конечно, электрические силы, о создании которых мы вскоре поговорим отдельно, а пока воспользуемся тем, что у нас уже есть, — двумя натёртыми палочками, стеклянной и пластмассовой. У стеклянной палочки, напомним, после натирания появляется положительный электрический заряд (+), у пластмассовой палочки отрицательный (—). Если эти палочки приложить к материалу, в котором есть свободные, то есть способные двигаться, заряды, например свободные электроны, то эти заряды действительно начнут упорядоченно перемещаться под действием электрических сил. Натёртая пластмассовая палочка своим «минусом» будет отталкивать отрицательно заряженные электроны, стеклянная палочка своим «плюсом» будет их притягивать (2). Небольшого заряда натёртых палочек, конечно, хватит на какие-то секунды или даже доли секунды, но в мысленном эксперименте этого достаточно, чтобы запомнить главное: электрические силы могут создавать упорядоченное движение свободных микрочастиц, имеющих собственный электрический заряд. Это движение частиц принято называть «электрический ток».

В давние времена, когда электроны ещё не были известны и, конечно же, не было известно, что в подавляющем большинстве случаев электрический ток создают именно они, двигаясь от «минуса» к «плюсу» (2), решили, что ток создают какие-то частицы с положительным зарядом, и поэтому ток идёт от «плюса» к «минусу». Так случилось, что это ошибочное представление не изменили, и поэтому нам приходится пользоваться условным направлением тока от «плюса» к «минусу», считая, что ток создают не электроны, а такие же частицы, но с положительным зарядом. Тем, кому трудно смириться с этой несправедливостью, полезно вспомнить, что в создании тока иногда участвуют положительные ионы, которые, конечно, двигаются в ту же сторону, что и условный ток (3, 4), от «плюса» к «минусу».

Попытаемся представить себе эту картину. Свободные электроны в межатомном пространстве соединительной медной проволоки, как всегда, непрерывно совершают свои беспорядочные, хаотические рывки в разные стороны, рывки тем более энергичные, чем выше температура проводника. Под действием внешних электрических сил, внешнего поля электроны кроме этих хаотических движений непрерывно смещаются в одном определённом направлении, и именно это смещение, это упорядоченное и сравнительно медленное движение электронов в одну сторону как раз и называется электрическим током. Хаотическое движение электронов определяет начальную температуру проводника, дополнительное упорядоченное движение, то есть электрический ток, нагревает проводник дополнительно.

Ещё раз напомним: натёртая пластмассовая палочка своим «минусом» (-) отталкивает электроны (-), и они выходят из неё в проводник. Натёртая стеклянная палочка своим «плюсом» (+) тянет к себе электроны (-), и они направляются к ней. Коротко говоря, под действием внешних электрических сил (генератор) электроны, имеющие свой электрический заряд «минус», упорядоченно двигаются в проводнике от «минуса» к «плюсу».

Проходит некоторое время, и ток в проводнике прекращается. Потому что все лишние электроны, которые были в пластмассовой палочке, ушли с неё и переселились в стеклянную палочку. Там они заняли свободные места в положительных ионах, превратив их в нейтральные атомы. Конечно, совсем не обязательно, чтобы это были те самые электроны, которые перешли в проводник с пластмассы, — те, что пришли в проводник, могут остаться в нём, а он взамен передаст стеклу такое же количество своих собственных свободных электронов, из тех, что были поближе к выходу из проводника. Все электроны одинаковые, и, как говорится, важен результат — в стеклянной и пластмассовой палочках в итоге исчезли избыточные электрические заряды, палочки, как принято говорить, разрядились и больше не создают внешнего электрического поля. А это значит, что генератор больше не двигает свободные электроны в проводнике, то есть через некоторое время после подключения проволоки к наэлектризованным палочкам электрический ток в проволоке прекратился. Сказанное для порядка «через некоторое время» не должно вводить в заблуждение — наэлектризованные палочки отдают свои избыточные заряды практически мгновенно, и ток в нагрузке ничего реально наработать не успевает.

Можно, конечно, усовершенствовать нашу первую

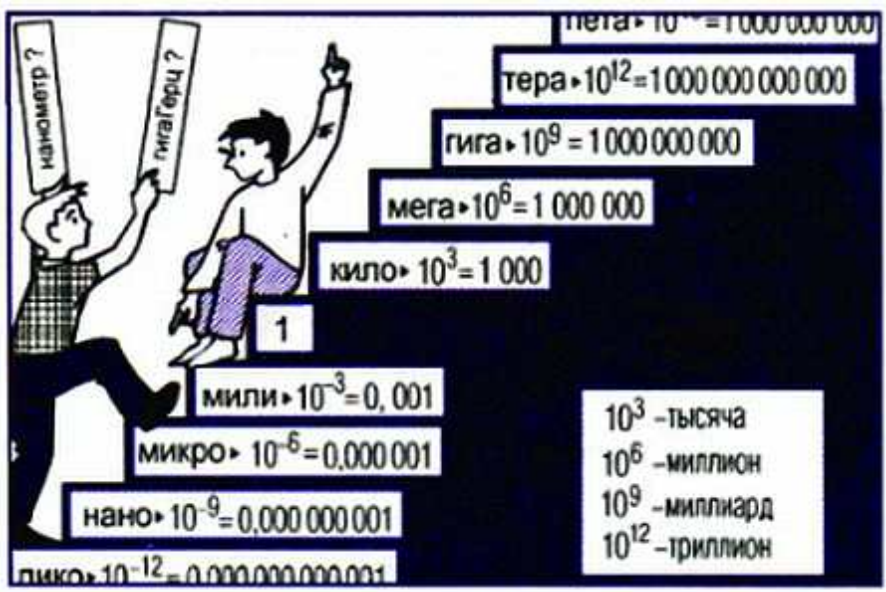
электрическую цепь. Можно заменить палочки пластмассовым и стеклянным дисками, непрерывно вращать их и непрерывно натирать, поддерживая таким образом постоянную наэлектризованность стекла и пластмассы. Можно ввести второй провод, по которому электроны, переброшенные с пластмассового диска на стеклянный, будут возвращаться обратно, чтобы вновь отправиться на работу в нагрузку, — мы получим при этом обычную замкнутую электрическую цепь. Но давайте ничего этого делать не будем, давайте считать, что наш первый несовершенный электрический завод свою учебную задачу выполнил и можно переходить к электрическим цепям, более близким к реальности.

вес - 1 кг
масса - 1 кг
1kg
Система СИ
(МКСА-метр, килограмм, секунда, ампер)
Длина - метр, м
Масса - килограмм, кг
Время - секунда, с
Вес (сила) - ньютон, Н
(притяжение к Земле массы 102г)
Работа - джоуль, Дж=Н•м
Мощность - ватт, Вт=Дж/с
Заряд - кулон, Кл или К
Ток - ампер, А=Кл/с
э.д.с. - вольт, В=Дж/Кл
Напряжение - вольт, В=Дж/Кл
Сопротивление - ом, Ом
Емкость - фарад, Ф=Кл/В
Индуктивность - генри, Гн
Частота - герц, Гц=период/с

ВК-48. *Привычка — дело серьёзное, её не всегда просто позабыть и забросить. Мы привыкли активно действовать и, в частности, писать правой рукой. Попробуй переучись на левую — не так-то это просто. Ещё один пример — привычка называть вес в килограммах, хотя известно, что для этого есть вошедший в международную систему СИ ньютон, равный весу примерно в 100 граммов. В житейских делах это ещё терпят, но ньютон обязательно входит в расчётные формулы, что делает их более простыми и удобными.*

***Т-41*. Химический генератор — первое знакомство.** Для начала, вместо того чтобы натирать тряпкой стекло и пластмассу, мы введём иной способ электризации и накопления избыточных

зарядов — в нашем новом генераторе всё это будет происходить за счёт энергии химических реакций. Мы представим себе этот генератор как небольшой сосуд со специально подобранным химическим раствором, его называют «электролит». В электролит вставлены две металлические пластины — два электрода. Электродами в электротехнике и электронике называют токопроводящие, чаще всего металлические детали, с помощью которых создают электрические поля и потоки зарядов. В телевизионной или осциллографической трубке, например, это цилиндры, сетки и графитовые покрытия на внутренней стороне стеклянной колбы. В установке для исследования электрической активности сердца — небольшие металлические лепестки, временно наклеенные на кожу. В некоторых биологических экспериментах роль электродов выполняют тончайшие иголочки, виртуозно вставленные в живую клетку.



ВК-49. *Приставки милли-, микро-, нано- или пико- перед какой-либо единицей (ампер, вольт, ватт и др.) говорят о том, что в данном случае используется единица, которая в тысячу, в миллион, в миллиард или в триллион раз меньше основной единицы. Аналогично приставки кило-, мега-, гига- и терра- говорят о том, что используется единица, которая в тысячу, в миллион, в миллиард или в триллион раз больше основной единицы.*

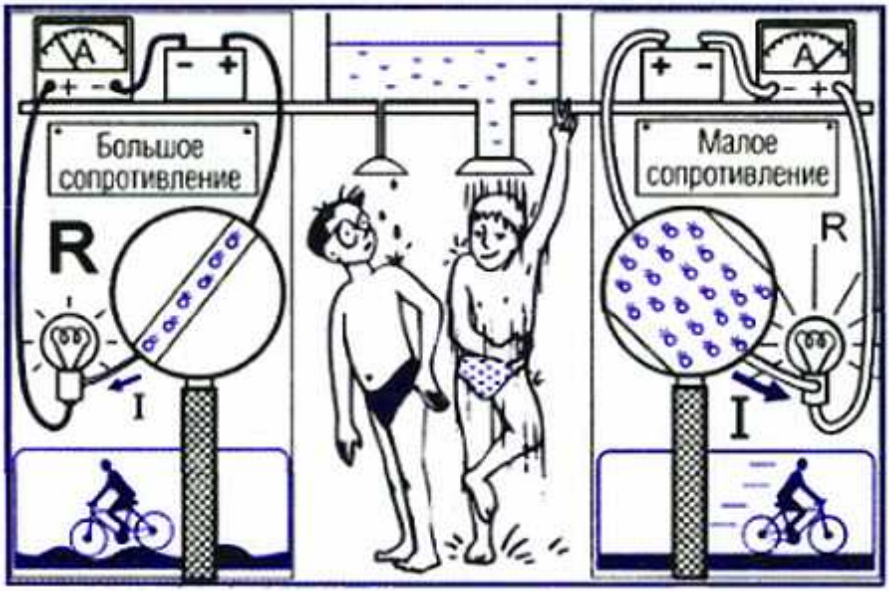
В нашем первом химическом генераторе электроды изготовлены из двух разных металлов, оба они активно, но по-

разному взаимодействуют с электролитом, вступают с ним в химические реакции. Одна из металлических пластин при этом отдаёт электроны своих нейтральных атомов и, следовательно, приобретает положительный заряд. Такая пластина называется «анод» — положительный электрод генератора, коротко, по-свойски (Т-8), его называют «плюс». Химические реакции второго металла с электролитом приводят к противоположному эффекту — пластина приобретает лишние, избыточные электроны, это катод — отрицательный электрод генератора, его «минус».

Химические генераторы, или, как их чаще называют, химические источники тока, бывают двух основных типов. Первый — гальванические элементы, они работают до тех пор, пока не разрушатся электроды или пока не придёт в негодность электролит. После этого считают, что гальванический элемент полностью разрядился, и выбрасывают его. Второй вид химических источников тока — аккумуляторы. После того как аккумулятор разрядился, то есть отдал свои запасы химической энергии, его можно восстановить — зарядить от другого источника электрической энергии. Аккумулятор допускает несколько десятков таких циклов заряд-разряд, но обычно до этого дело не доводят — аккумулятор подзаряжают непрерывно так, чтобы он всегда был полностью заряжен.

Для этого аккумулятор постоянно подключён к зарядному устройству (буферный режим), а несложная автоматика поддерживает нужной величины зарядный ток.

При натирании стеклянной и пластмассовой палочек мы затрачивали на их электризацию свои мускульные силы. А какая сила в аккумуляторе электризует электроды, например вталкивает (Т-8) электроны в «минус», преодолевая отталкивание уже имеющихся там избыточных электронов? Ответ прост — это делает энергия, которая высвобождается в химических реакциях между электродами и электролитом.



ВК-50. *Важная характеристика электрической цепи и отдельных её участков— их сопротивление (обычно обозначается буквой* ***R****). Оно говорит о том, в какой мере затруднено движение свободных зарядов в данном участке цепи, насколько столкновение с его атомами ослабляет электрический ток. Гидравлическая аналогия, для многих более привычная и понятная, чем то, что события в электрических цепях, наверняка поможет понять то, что происходит в невидимом электрическом мире.*

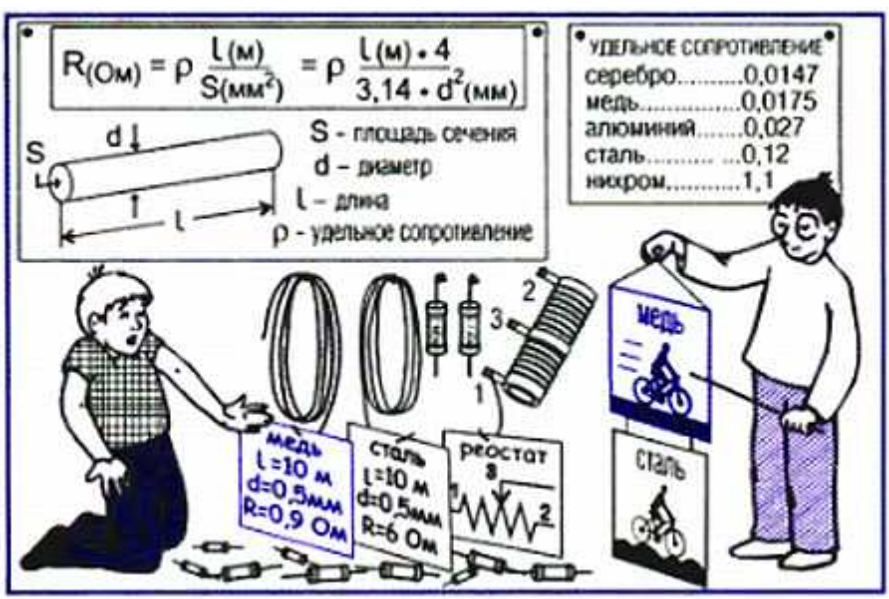
При зарядке аккумулятора в электродах образуются вещества с некоторым запасом энергии в их электронных оболочках, а при разряде идут химические реакции, в которых эта энергия выделяется, поддерживая накопление электрических зарядов на электродах. Таким образом, именно за счёт химических реакций, отдающих энергию, создаётся электродвижущая сила аккумулятора и поддерживается ток в цепи.

О химических источниках тока мы ещё поговорим подробно, поскольку это очень распространённые устройства. Достаточно вспомнить, что аккумулятор есть в каждом автомобиле, тракторе или самолёте, а гальванические элементы (их часто называют батареями, или батарейками, хотя, строго говоря, это название относится не к единичным гальваническим элементам, а к блоку из нескольких соединённых химических источников тока) работают в самой разнообразной переносной электронике, не говоря уже о карманных фонарях.

Т-42. **Карманный фонарик — простейшая реальная**

электрическая цепь. В качестве первой подопытной реальной электрической цепи мы выбираем простейший карманный фонарик. Рисунок Р-25 даёт представление о внешнем виде одной из моделей фонаря, расположении и электрическом соединении его деталей. Рисунок также показывает, как изображается соединение этих деталей в виде условной схемы.

Схема предельно проста. Гальванический элемент $\mathbf{Б}_1$ (он обозначен буквой $\mathbf{Б}_1$, от слова «батарея», такое обозначение принято для всех химических источников тока) имеет два вывода, к которым внутри элемента подключены его электроды — «плюс» и «минус». К обоим выводам прижаты пружинящие контакты самого фонарика, и таким образом гальванический элемент включён в цепь. Аналогично через контакты патрона включена в цепь нагрузка — лампочка $\mathbf{Л}_1$. Следующая деталь — выключатель $\mathbf{Вк}_1$. Когда он замкнут, то все токопроводящие детали фонарика ведут себя просто как единый, непрерывный кусок провода. Если же выключатель $Вк_г$ разомкнут, то он создаёт разрыв цепи — в цепь фактически включён диэлектрик, воздушный участок. В диэлектрике свободных зарядов нет, и при последовательном его включении в цепь ток в ней невозможен — цепь разорвана.



ВК-51. *Сопротивление **R** проводника зависит от его длины **L**, от площади его поперечного сечения **S**, то есть от диаметра **d**, а также от материала. Единица сопротивления ом (Ом), примерно такое сопротивление имеет медный провод диаметром 0,5 мм (сечение — около 0,18 мм^2) и длиной около 10 м. В электротехнике*

и в электронике широко используют детали, основная задача которых — оказывать определённое сопротивление электрическому току, эти детали так и называются — «сопротивления» (резисторы).

Соединительные провода в фонарике выполнены в виде жестяных пластинок, из-за их малой длины потери в них можно не учитывать, и провода отображаются на схеме обычными тонкими линиями. Когда выключатель замкнут, электроны непрерывно двигаются от «минуса» к «плюсу» — в цепи идёт ток, он сильно нагревает нить лампочки, и она светится. Одновременно появляется ионный ток в электролите батарейки, он возвращает её «минусу» электроны, которые ушли из него и по внешней цепи (лампочка, замкнутый выключатель, соединительные провода) добрались до «плюса». Благодаря этому внутреннему току на «минусе» сохраняется избыток электронов, на «плюсе» — их нехватка. Так продолжается до тех пор, пока батарейка не израсходует свои запасы химической энергии.

Глава 4
Не нужно бояться вопроса «сколько?»

Чтобы разобрать какой-нибудь автомобильный агрегат, нужен хороший набор инструментов. Электрические и электронные аппараты в этом отношении имеют серьёзное достоинство — многие из них вполне можно разобрать одной отвёрткой. Но что дальше? Хороший автомеханик сможет не только разобрать незнакомый агрегат, но и разобраться в нём — он видел много самых разных машин, понимает, можно даже сказать, чувствует механику. А вот в электрических и электронных аппаратах многое скрыто от нас, и трудно понять, что происходит в бессчётных деталях и хитросплетении проводов. Здесь нужно, прежде всего, знать, как характеристики какого-либо процесса (напряжение, ток, мощность и другие) влияют на работу всего аппарата. А для этого нужно знать, какими «метрами» и «граммами» пользуются электрики — как не только словами, но и цифрами оценивают электрическую цепь и то, что в ней происходит.

Т-43. **Об электрической цепи иногда необходимо рассказывать не словами, а цифрами**. С помощью карманного фонаря мы кое-что осветили в скрытых от взора электрических процессах, но открылась нам, как принято говорить, лишь качественная картина: «Потери в проводах можно не учитывать», «На «минусе» сохраняется избыток электронов, на «плюсе» — недостаток», «В цепи идёт ток», «Ток сильно нагревает нить лампочки». Чтобы управиться с фонариком, этих представлений более чем достаточно, но в наших планах знакомство с электрическими машинами, более сложными и даже значительно более сложными, чем карманный фонарь. Чтобы понять протекающие в них процессы, нам нужно будет пользоваться не только качественными, но и количественными оценками. «В цепи идёт ток». Насколько сильный? «Ток сильно нагревает нить лампочки». Какая при этом расходуется мощность? «На «минусе» сохраняется избыток электронов». С какой силой он выталкивает их во внешнюю цепь?

Коротко говоря, нужно научиться рассказывать об

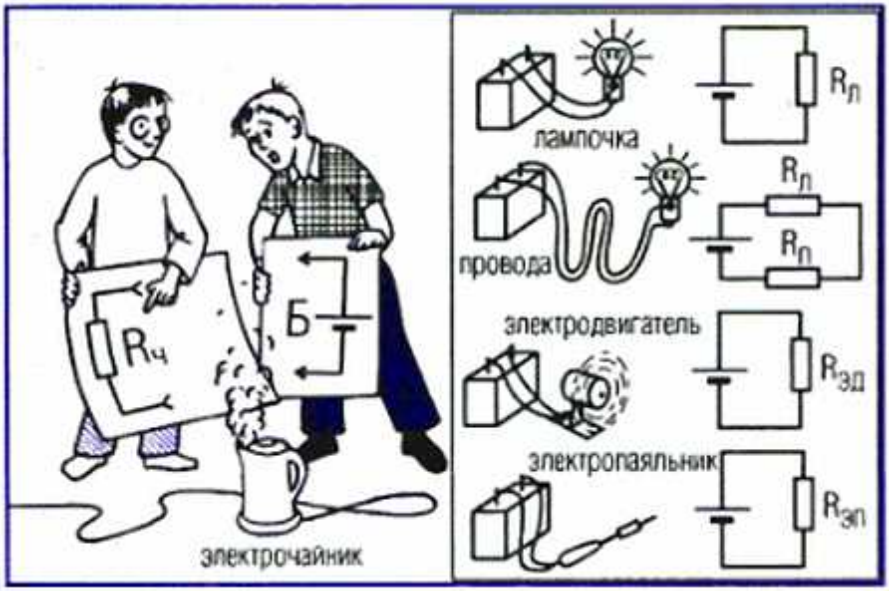
электричестве не только словами, но и цифрами, что, кстати, мы очень часто делаем в повседневной жизни. Ведь когда вы приходите в магазин, то не пользуетесь словами «много» или «мало», вы называете продавцу цифру и единицу измерения, например просите у него 2 литра молока, 300 граммов сыра или 12 штук тетрадей в клеточку.

Давайте ещё раз воспользуемся простой и понятной схемой карманного фонаря и с её помощью введём несколько очень важных количественных характеристик, ими можно будет потом широко пользоваться при знакомстве с другими электрическими схемами.

Т-44. **Единица электрического заряда — *кулон* (К).** Начнём с самого начала, попробуем количественно оценить первопричину всех электрических процессов — электрический заряд.

Единица длины — метр, массы — килограмм, времени — секунда. Согласованная с ними единица электрического заряда — кулон, сокращённо К. Эта единица названа в честь Шарля Кулона (1736–1806), одного из основателей науки об электричестве. Согласно традиции единица измерения, которая происходит от собственного имени, в сокращённом виде обычно начинается с большой буквы, и поэтому сокращённое обозначение метра — м, секунды — с, килограмма — кг, а кулона — К. Но когда такую единицу пишут полностью, большая буква в начале неуместна, и мы пишем 5 К, но 5 кулонов.

Каждый, конечно, представляет себе длину один метр, массу один килограмм тоже представить нетрудно, такую массу имеет литр воды. Да и секунда вполне ощутимый интервал времени: спокойно произнесите «двадцать один» — и на это уйдёт примерно секунда. А что такое кулон? Много это или мало? Как можно представить себе такой электрический заряд?



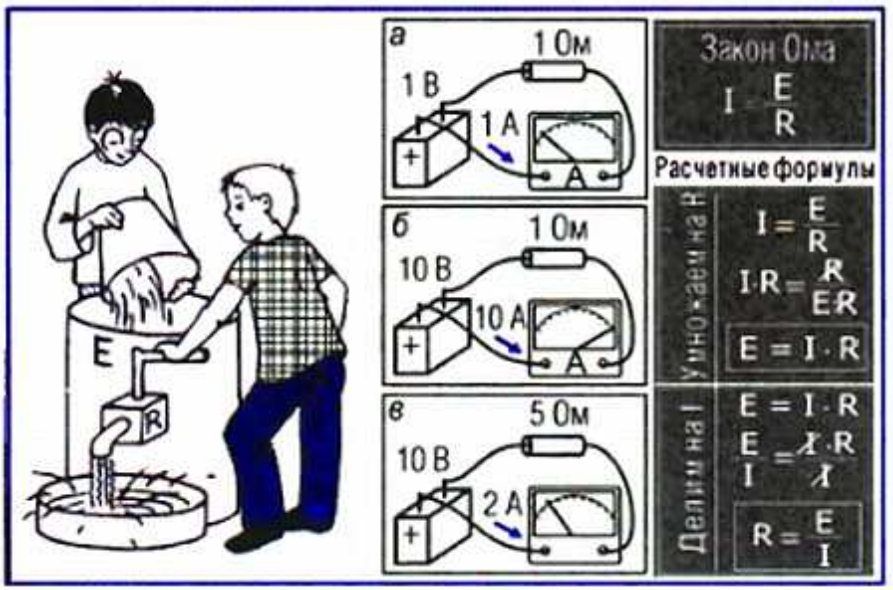
ВК-52. *На электрических схемах многие их элементы, например лампочки, электродвигатели, соединительные провода, часто отображают в виде сопротивлений. Это вполне возможно потому, что при анализе схемы и расчётах достаточно знать лишь сопротивление R того или иного элемента. Да и самому паяльнику или кофеварке не требуется от генератора каких-либо специальных условий, достаточно получить от него необходимое напряжение и мощность, которая обеспечит заданную силу тока.*

У натёртой стеклянной палочки очень небольшой заряд — миллионные доли кулона. Но отсюда совсем не следует, что целый кулон — это какая-то астрономическая величина. У наэлектризованной палочки заряд небольшой, но и электрические силы её невелики, она всего лишь поднимает лёгкие клочки бумаги. Даже в карманном фонарике действуют совсем иные заряды — «минус» батареи (отрицательный электрод) каждую минуту поставляет в цепь электроны с суммарным зарядом уже 0,2–0,5 кулона, а в средний электродвигатель из сети может за секунду поступать заряд в десятки кулонов.

Здесь уместно вспомнить, что электрон и протон — это частицы с самой маленькой порцией электрического заряда. Отрицательный заряд электрона, так же как положительный заряд протона, составляет примерно $0{,}15 \cdot 10^{-18}$ К, то есть 0,15 миллиардной части от одной миллиардной части кулона. Отсюда следует: чтобы получить электрический заряд в один кулон, нужно собрать вместе примерно $6 \cdot 10^{18}$ электронов, то есть 6

миллиардов миллиардов (6 квинтиллионов) штук. Эту кучку электронов (Т-8) можно условно представить себе как своего рода эталон — как 1 К отрицательного электрического заряда. Можно представить себе такой же эталон положительного заряда из мысленно собранных вместе $6 \cdot 10^{18}$ протонов.

Заряд в один кулон в виде кучки из $6 \cdot 10^{18}$ электронов или протонов для нашего воображения непосильная задача — очень уж много микрочастиц нужно собрать вместе. Но не стоит из-за этого огорчаться — хорошо, хоть можно думать об единице заряда, как о некоторой реальности, смирившись со всеми непостижимостями масштабов микромира. Что поделаешь — в природе встречаются именно такие основные электрические детали, и любое физическое тело, обладающее электрическим зарядом, получило его как сумму электрических свойств миллиардов или триллионов атомных частиц.



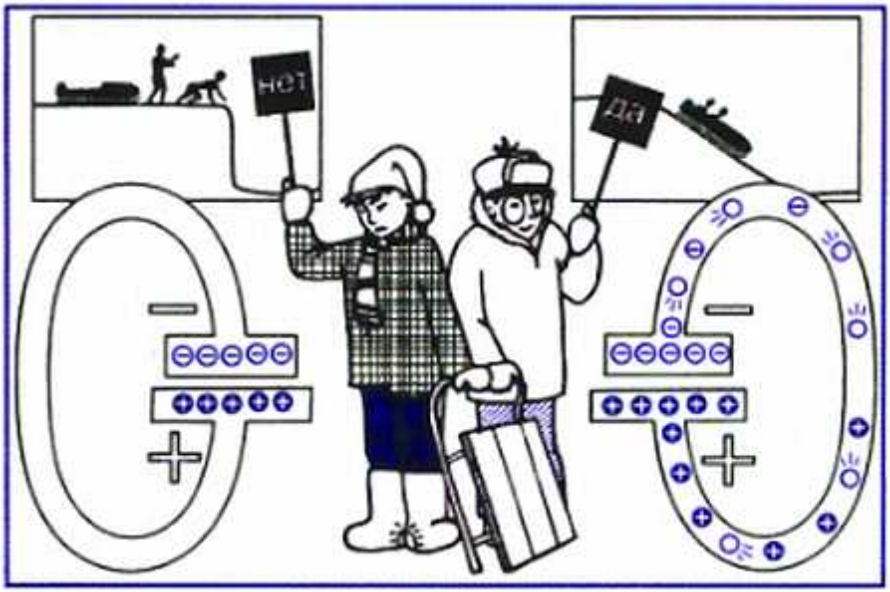
ВК-53. *Закон Ома — очень важная, очень простая и очень понятная зависимость между электродвижущей силой* ***E****, сопротивлением* ***R*** *и током* ***I*** *в простейшей электрической цепи: чем больше э.д.с.* ***E*** *— тем больше ток* ***I****, чем больше сопротивление* ***R*** *— тем меньше ток. Из основной формулы закона Ома* $I = E : R$ *легко получить две расчётные формулы — для вычисления э.д.с.* ***E*** *и сопротивления* ***R****. Для получения первой достаточно обе части основной формулы умножить на* ***R****, для второй — результат разделить на* ***I****.*

Реально заряд в 1 К (один кулон) не удастся получить, сложив вплотную и собрав в маленьком объёме необходимое для этого количество протонов или электронов. Частицы с одноимённым зарядом будут расталкиваться с такой огромной силой, что в одну микроскопическую пылинку их не сожмёшь. Вспомните, только мощнейшие ядерные силы могут преодолеть электрическое расталкивание одноимённых зарядов и объединить в атомном ядре несколько десятков протонов.

Всё сказанное должно стать важной составной частью нашего представления об электрическом королевстве. Здесь во всех машинах и технологиях, в том числе в энергетике больших мощностей, работают чрезвычайно малые и чрезвычайно слабые, по нашим человеческим меркам, работники — в основном свободные электроны. Но количество их всегда настолько велико, действовать они могут настолько согласованно, и управлять этими действиями удаётся настолько точно, что микроскопические электрические невидимки совместно демонстрируют гигантские мощности и чрезвычайно высокое, просто-таки виртуозное мастерство.

После того как мы определили единицу электрического заряда, можно без особых трудностей ввести очень важную характеристику электрических цепей — величину тока, или, иначе, силу тока.

***Т-45*. Единица силы тока — *ампер* (А).** Сила тока одна из самых естественных и самых понятных характеристик — она говорит о том, насколько интенсивно упорядоченное движение свободных зарядов в каком-либо участке электрической цепи. Слово «интенсивность» часто используют при оценке автомобильного движения. Если, например, мимо вашего дома каждую минуту проносится два-три десятка автомобилей, то считайте, что вы живёте на улице с интенсивным движением, а если два-три десятка автомобилей проезжают по вашей улице за сутки, то интенсивность движения, конечно, невелика. При оценке величины электрического тока вместо характеристики интенсивность принято употреблять характеристику сила — в этом случае она имеет примерно тот же смысл, что и в выражении «сильный дождь».



ВК-54. *Если к генератору, например к химическому, ничего не подключено, то избыточные заряды соберутся на его электродах и между «плюсом» и «минусом» окажется своего рода электрический «обрыв». Но если к генератору подключить внешнюю цепь, то вместо «обрыва» появится электрический «пологий спуск» — избыточные заряды автоматически распределятся в цепи и будут своим электрическим полем подталкивать свободные электроны на всём их пути во внешней цепи от «минуса» к «плюсу».*

1
200°C
2500°C
2
3
При ударе часть энергии выделяется в виде тепла.
Удобное представление о тепловом действии электрического тока - быстрые электроны ударяются о неподвижные атомы основного вещества и при этих ударах выделяется тепло.

Р-16. ПОЛЕЗНЫЙ ОБМАН — НАПОМИНАНИЕ ОБ УДАРЕ. Многие, возможно, видели, как при ударе большим молотом по куску гранита из него вылетают

искры, — это часть энергии удара превращается в тепло и оно накаляет разлетающиеся мельчайшие осколки камня. Примерно так же нагреваются ладони при бурных аплодисментах или пила в результате мелких и частых ударов её зубьев о распиливаемое дерево. И таким же образом электрический ток нагревает металл, по которому он движется, — свободные электроны, включившиеся в этот ток, сталкиваются с неподвижными атомами вещества, в котором он протекает. При этом, конечно, ток пропускают не по меди или алюминию, в которых свободные электроны двигаются легко и почти беспрепятственно. Ток пропускают по металлам, где электроны часто сталкиваются с атомами самого вещества и легко превращают в тепло значительную часть своей энергии. Это, конечно, упрощённая картина, и нужно не забывать об этом упрощении.

Используя металлы, которые не плавятся при достаточно высокой температуре (например, вольфрам плавится при 3380 градусах), и переместив все события в небольшой стеклянный баллон, из которого откачан воздух с его кислородом, или в баллон, который заполнен газом, не допускающим быстрого разрушения металла, создают простейшие электрические лампы, излучающие свет. Тепловое действие тока начали использовать более 200 лет назад, а вот электрическая лампочка появилась ещё лет через 70, ей недавно исполнилось 130 лет.

Электрический ток, если в нём участвуют свободные ионы, может выполнять ещё одну важную работу, именуемую «гальванопластика», — ионы могут переносить вещество, которое они представляют. Так, например, на дешёвом чёрном металле технология гальванопластики создаёт блестящее никелевое или иное декоративное и защитное покрытие.

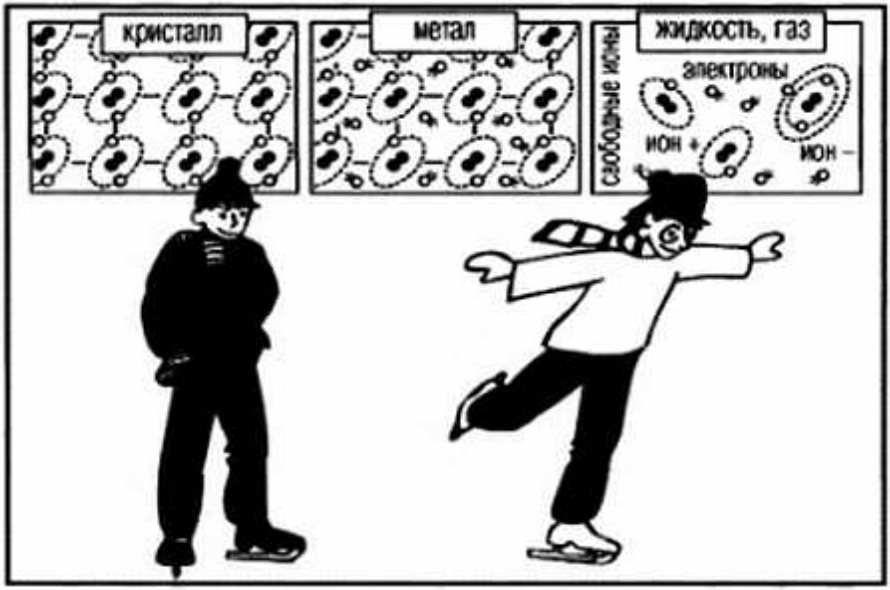
Чтобы понять, как именно оценивается сила тока в проводнике, попробуйте представить себе, что внутри этого проводника создан своего рода контрольный пункт — проводник как бы перегорожен поперечной сеткой, и автоматы с фотоэлементами считают, сколько зарядов проходит через это поперечное сечение за единицу времени. В металлическом проводнике, в частности, таким способом подсчитывается количество электронов, которые упорядоченно смещаются в одну

сторону, от «минуса» к «плюсу». Чем больше электронов проходит через наш условный контрольный пункт за определённое время, тем, следовательно, выше интенсивность их движения, тем больше, тем сильнее ток.

Единица силы тока — ампер, сокращённо А (большая буква, как и в сокращённом обозначении кулона). Многие уже, конечно, догадались, что имя единице измерения тока дал французский профессор Андре Мари Ампер (1775–1836), глубоко понявший основы взаимосвязи электричества и магнетизма. Нетрудно создать наглядный образ единицы измерения тока — если через поперечное сечение проводника за 1 секунду проходит заряд в 1 кулон (например, $6 \cdot 10^{18}$ электронов), то ток в этом проводнике составляет 1 ампер. Если за 1 секунду через наш контрольный пункт проходит 2 кулона, то ток, соответственно, равен 2 ампера, а если 1 кулон проходит через контрольный пункт (поперечное сечение проводника) за 10 секунд, то сила тока в проводнике составляет 0,1 ампера, так как за секунду проходит лишь одна десятая часть кулона. Подводя итог этой арифметике, запишем: 1А = 1 К/1 с, что означает «1 ампер — это интенсивность движения зарядов, при которой через условное поперечное сечение проводника проходит 1 кулон за 1 секунду».

Заканчивая представление, или, как сейчас любят говорить, презентацию, характеристики «сила тока», нужно сделать важное пояснение, о котором мы уже мельком сказали. Оно, кстати, окажется необходимым и для презентации другой очень важной характеристики электрических цепей — электродвижущей силы.

***Т-46*. Встречаясь со словом «сила», нужно помнить, что оно может иметь несколько разных значений.** Когда человек, создав разговорный язык, стал давать названия предметам и явлениям, стал навешивать на них таблички-слова (Т-39), то случались и ошибки в этом непростом деле. Например, разным предметам давали одно и то же название, вспомните «ключ» — источник чистой воды и «ключ» — приспособление для открывания замка. Другой пример слово «коса» — элемент женской причёски, песчаная отмель и, наконец, инструмент для скашивания травы.



ВК-55. *Начиная заниматься каким-либо новым разделом электротехники, например, упрощёнными её практическими схемами, нужно постараться вспомнить полученную ранее полезную информацию. Но кроме того нужно, как говорится, морально подготовиться, успокоить себя, снять чувство страха, подумать о том, что миллионы людей уже проходили этот путь и завершали его победителями. Это видно по высокому уровню развития электротехники в нашем мире и по широкому использованию электричества.*

Часто у слова появлялось несколько значений в процессе развития языка — от простейшего названия какой-либо вещи слово могло стать наименованием целого класса предметов или даже приобрести переносный смыл, как, скажем, слово поднять: поднять (переместить вверх) камень, поднять (улучшить) настроение, «поднять» (сделать более жёсткой) дисциплину. Язык — дело сложное, живое, он живёт и изменяется вместе с человеком и его миром.

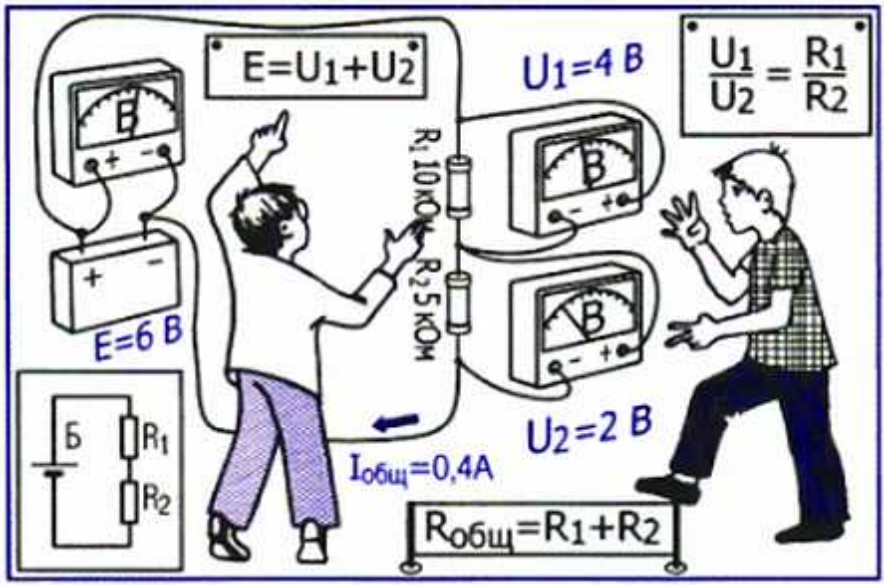
Слово «сила» тоже имеет несколько значений, одно из них — чисто физическая характеристика, она уже упоминалась, и вскоре мы поговорим о ней подробнее (Т-48). В этом случае сила говорит, в какой мере одно тело старается (Т-8) механически переместить, сдвинуть с места другое тело, то есть сила понимается как мера механического воздействия одного тела на другое. Самый знакомый пример — сила земного притяжения. С помощью пружинных весов легко обнаружить, что Земля

притягивает арбуз с большей силой, чем грушу, и эта сила земного притяжения имеет отдельное название — вес. Из посещений продовольственного магазина хорошо известны единицы измерения веса — в некоторых странах в ходу грамм и килограмм (1000 граммов), в других — фунт (456 граммов) и унция (около 30 граммов).

В физике, а теперь и в технике используют другую единицу силы, она очень скоро появится и у нас в рассказе о важнейших характеристиках электрической цепи.

В словосочетании «сила тока» слово «сила» — это, скорее, литературное украшение, чем точный физический термин. Как уже говорилось, слово «сила» здесь используется в том же примерно смысле, что и в выражении «сильный дождь», и говорит оно совсем не о силе, а об интенсивности, о массовости движения электронов. Точно так же, как в примере с дождём, слово «сильный», если вдуматься, тоже никакого отношения к физическому термину «сила» не имеет и говорит об интенсивности, о массовости падения капель воды: если за минуту на вас упало несколько капель, то дождик слабенький, а если за ту же минуту на вас вылилось полведра — дождь очень сильный.

Одно время, чтобы уйти от всей этой путаницы, вместо термина «сила» тока употребляли «величина тока», или просто одно слово «ток». Последнее, кстати, очень удобно: «ток 5 ампер», «ток увеличился», «ток в этом проводнике можно подсчитать по простой формуле». Разве не понятно, что речь идёт о величине, о силе тока? В учебной и технической литературе можно встретить все три приведённых выражения (ток, сила тока, величина тока), и теперь, после подробных разъяснений, это, можно надеяться, не приведёт к какой-либо путанице.



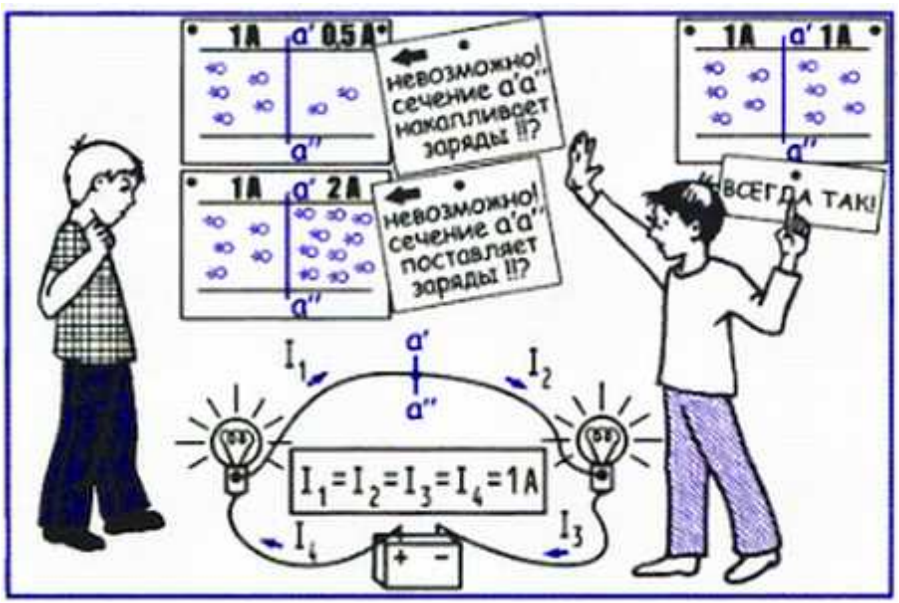
ВК-56. *Общее сопротивление последовательно соединённых сопротивлений равно их сумме, а электродвижущая сила (э.д.с.) генератора автоматически делится между ними. Чем больше сопротивление участка, тем большая часть э. д.с. ему достаётся — только в этом случае во всей последовательной цепи идёт одинаковый ток. Часть э.д.с., действующая на каком-либо участке, называется напряжением, или падением напряжения (обычно обозначается буквой **U**), и так же, как сама электродвижущая сила, измеряется в вольтах.*

Т-47. **Система единиц — комплект взаимосвязанных единиц измерения, который наряду с принципиальными достоинствами позволяет упростить вычисления**. Длину во многих странах принято измерять в метрах или в миллиметрах, а в некоторых — в футах (примерно 30 сантиметров) и в дюймах (1 дюйм равен примерно 25 миллиметров). И если вы собираете машину из деталей, которые изготовлены в этих разных странах, то и размеры деталей на чертежах могут быть указаны где в дюймах, а где в миллиметрах. Нужно будет сделать немало пересчётов, чтобы понять, что с чем и как стыкуется. Даже время автомобильной поездки долго пересчитываешь, если на карте расстояние указано в милях (примерно 1,6 километра), а скорость автомобильный спидометр показывает в километрах в час.

В какое-то время в мире стали появляться системы единиц, внутри которых все единицы согласованы, и, по крайней мере, не нужно заниматься пересчётами, используя единицы одной

системы. Сегодня существует несколько систем единиц, каждая из них имеет свое название, например система СИ (Система интернациональная, по-английски SI — Sistem International), система СГС и другие. Внутри системы все единицы измерения связаны естественным образом, как, например, уже знакомые нам кулон, секунда и ампер. Мы будем использовать очень распространённую систему СИ, которую ещё называют системой МКСА по первым буквам её единиц длины, массы, времени и тока: метр, килограмм, секунда, ампер. Согласно Государственным стандартам России, Германии, Японии, Франции, Италии, Китая и многих других стран, система СИ (МКСА) считается основной для промышленности, она встречается в учебной литературе, в том числе в школьных учебниках.

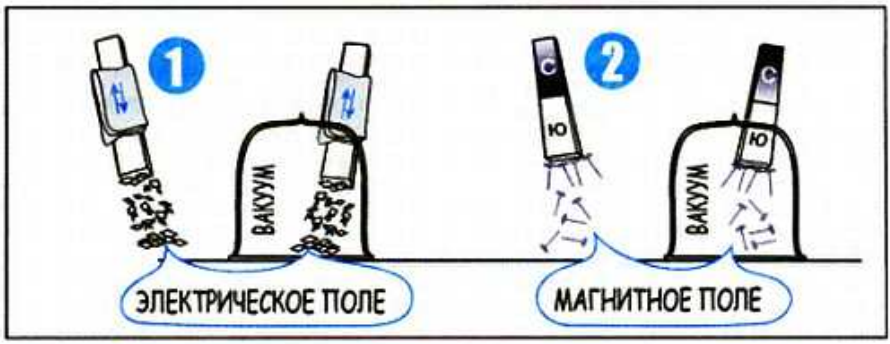
Мы уже знакомы с двумя единицами системы СИ, применяемыми в электротехнике, — это кулон и ампер. Чтобы познакомиться с остальными электрическими единицами системы СИ, придётся провести небольшую подготовительную работу — поговорить о трёх чрезвычайно важных единицах измерений, которые используются во всех отраслях техники, — это единицы силы, работы и мощности.



ВК-57. *Во всех участках последовательной цепи должен быть одинаковый ток. Иначе на участке* ***a'—a''*** *произойдёт необъяснимое накопление либо исчезновение электрических зарядов. Если к границе* ***a'—a''*** *приходит больше зарядов, чем уходит, то эти*

лишние заряды нужно куда-то складывать для хранения.

Но куда? Если от границы ***a'—a"*** *уходит больше зарядов, чем приходит, то лишние заряды нужно откуда-то брать. Откуда? Ответов на эти вопросы нет, но они и не нужны — ток во всей цепи одинаков.*



Р-17. КОЕ-ЧТО НЕВИДИМОЕ И ДЛЯ НАС ПОКА НЕПОНЯТНОЕ ПО ИМЕНИ «ПОЛЕ». Чтобы как можно проще рассказать о том, чему посвящён этот рисунок, нам лучше всего вернуться к рисунку Р-1 и ещё раз воспроизвести здесь один из его фрагментов, на котором натёртая стеклянная палочка притягивает мелкие клочки бумаги. Как это всё начиналось? Мы приближали палочку к кучке мелких бумажек, и вдруг они начали тянуться к стеклу. Кто их зацепил? Каким способом? Если кто-нибудь догадается, что в пространстве между бумажками и стеклом действовали какие-то атомные структуры в виде нитей или крючков, то мы с этой догадкой отправим её автора к точно такому же эксперименту, проведённому в вакууме (1). Здесь нет никакого вещества, то есть в принципе не может быть каких-либо крючков или нитей, а результат тот же — мелкие бумажки тянутся к электрическому заряду стекла. Чтобы не затягивать разбирательства, скажем сразу о главном. О том, что кроме вещества, которое мы все прекрасно знаем, видим, чувствуем и представляем себе в виде каких-то конструкций из атомов и молекул, кроме этого вещества существует нечто, названное словами «электрическое поле», которое мы не знаем, не видим, не чувствуем и т. д., но которое есть и умеет выполнять определённую электрическую работу. Оно может, например, от натёртого стекла в идеальном вакууме (в нём нет никакого вещества, но электрическое

поле в нём есть) передать клочкам бумаги энергию для движения к электрическому заряду палочки.

Точно так же магнит создаёт магнитное поле (2), масса — гравитационное поле и т. д. А из сказанного надо бы запомнить одно: мы пока не можем увидеть, пощупать рукой и представить собеседнику простыми словами все эти и иные физические поля, но они есть и работают. Доказательства? Только что проведённые простые опыты, которые каждый может повторить или придумать новые.

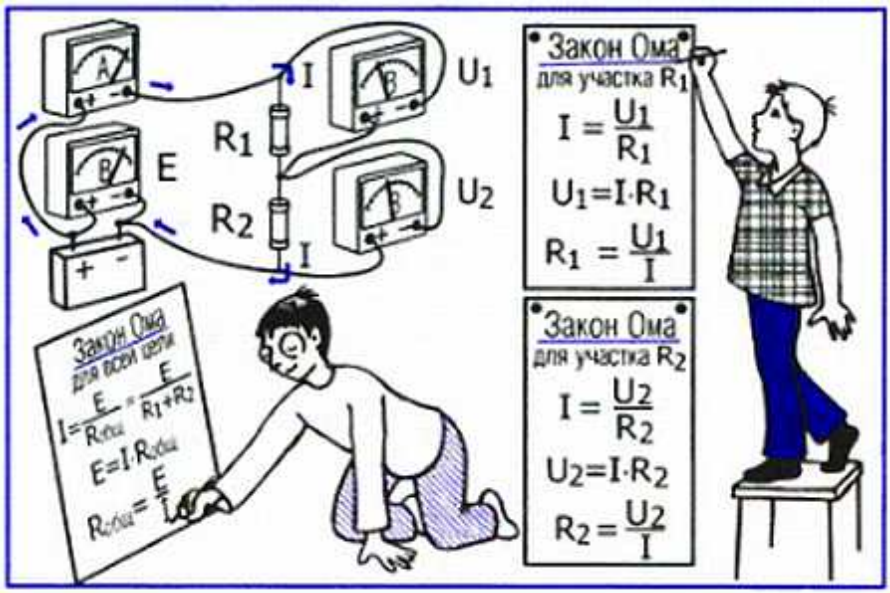
***Т-48*. Единица силы (веса) — *ньютон* (Н).** В повседневной жизни мы привыкли к тому, что сила измеряется в граммах или килограммах, — к этому нас приучили магазинные весы. Если весы показывают, например, что пакет сахара весит 2 кг (два килограмма), то это означает, что пакет притягивается к Земле с силой 2 кг, поскольку вес — это не что иное, как сила притяжения к Земле. Чтобы поднять этот пакет сахара, вам нужно приложить направленную вверх силу более чем 2 кг, которая преодолеет земное притяжение и двинет пакет вверх. А вот притяжение к Луне на её поверхности в десятки раз меньше земного, и вашим мускулам придётся создать усилие всего в 300 г (триста граммов), чтобы поднять двухкилограммовый пакет с сахаром.

Итак, весы продовольственных магазинов приучили нас к тому, что силу гравитационного притяжения к Земле, то есть вес, отмеряют в граммах и килограммах. В то же время в системе единиц СИ (МКСА) в килограммах измеряется масса тела, и это очень неудобно, когда в одних и тех же единицах измеряют две разные величины. Вспомните: масса неизменная, можно сказать, вечная характеристика какого-либо тела, она говорит о количестве вещества в нем. А сила — характеристика, так сказать, временная и притом местная. Она говорит о том, насколько эффективно на данное тело в данном месте и в данный момент воздействуют данные конкретные поля, например, электрическое поле натёртой палочки или гравитационное поле Луны. Единицы измерения устанавливаем мы сами, и в каком-то смысле даже удобно то, к чему мы привыкли, — измерять вес в килограммах. Но с точки зрения физики измерять массу и силу в килограммах — это примерно то же самое, что измерять в килограммах вес человека и его рост.

Одно время, чтобы избежать путаницы, слова «грамм» или «килограмм» употребляли с добавками, а именно килограмм массы (кг) и килограмм силы (кг). Но даже такая хитрость не

помогла бы ввести килограмм силы в систему СИ — это для неё крайне неудобная, можно сказать, противоестественная единица. В системе СИ наиболее просто и естественно появилась единица силы, которую назвали очень почётно ньютон (Н) — это название хранит имя великого физика и математика Исаака Ньютона (1643–1727). Согласно определению, 1 ньютон это такая сила, под действием которой масса 1 кг приобретает ускорение 1 м/с^2. Нетрудно найти эквивалент ньютона в привычных магазинных единицах веса — он равен 102 граммам, столько примерно весит полстакана воды, молока или виноградного сока. Несколько странное, неровное число 102 появилось из соотношения 1 килограмм силы = 9,8 ньютона, а число 9,8 берёт своё начало от земного ускорения 9,8 м/с^2.

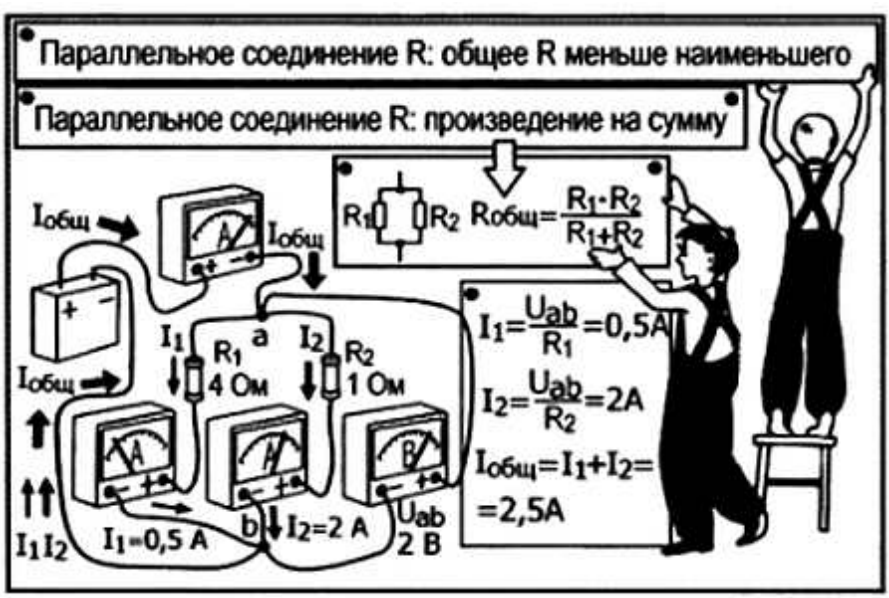
Имея единицу длины метр (м) и силы ньютон (Н), легко получить в системе СИ единицу для измерения работы и энергии.



ВК-58. *На любом участке последовательной цепи действует закон Ома в главном такой же, как для всей цепи (ВК-53). Вместо э.д.с.* ***E*** *в нём фигурирует напряжение* ***U****, то есть часть электродвижущей силы, доставшаяся участку цепи, для которого рассматривается закон. В данном случае закон Ома указывает соотношение между напряжением* ***U****, сопротивлением* ***R*** *и током* ***I*** *на этом участке. Например, такое* ***U = I·R*** *или такое* ***I = U: R****. Из первой формулы можно получить удобную расчётную формулу* ***R = U: I.***

Т-49. **Единица работы и энергии — *джоуль* (Дж).** Работа (не в житейском смысле «большая работа», «хорошо поработал» и тому подобное, а как точная физическая и техническая характеристика) есть произведение работавшей силы на путь, на котором эта сила работала. Единица работы в системе СИ — джоуль (Дж) — названа по имени английского физика Джеймса Прескотта Джоуля (1818–1889), многое прояснившего в области преобразований энергии. Эта единица соответствует работе, которую выполнит сила в один ньютон (1 Н) на пути в один метр (1 м), то есть 1 Дж = 1 Н·1 м. Поэтому когда вы произносите тост и свой стограммовый (102 г = 1 Н) бокал виноградного сока поднимаете на метровую высоту, то выполняете работу в один джоуль (1 Дж = 1 Н·1 м). А чтобы поднять на тот же метр наш знаменитый двухкилограммовый (примерно 20 Н) пакет сахара, нужно произвести работу примерно в 20 джоулей.

При решении подобных простых задач случаются тоже простые и поэтому особо обидные ошибки. Когда мы поднимаем пакет сахара, то на всём пути прикладываем к нему направленную вверх силу 20 ньютонов, которая и противодействует силе земного притяжения, противодействует весу. Но если мы перевозим этот пакет (вес 20 Н) в тележке по горизонтальной плоскости, то силу наверняка нужно будет приложить значительно меньшую, она должна лишь преодолеть трение в подшипниках колёс и иные виды потерь энергии. Поэтому мы и используем тележки при перевозке тяжёлых грузов.

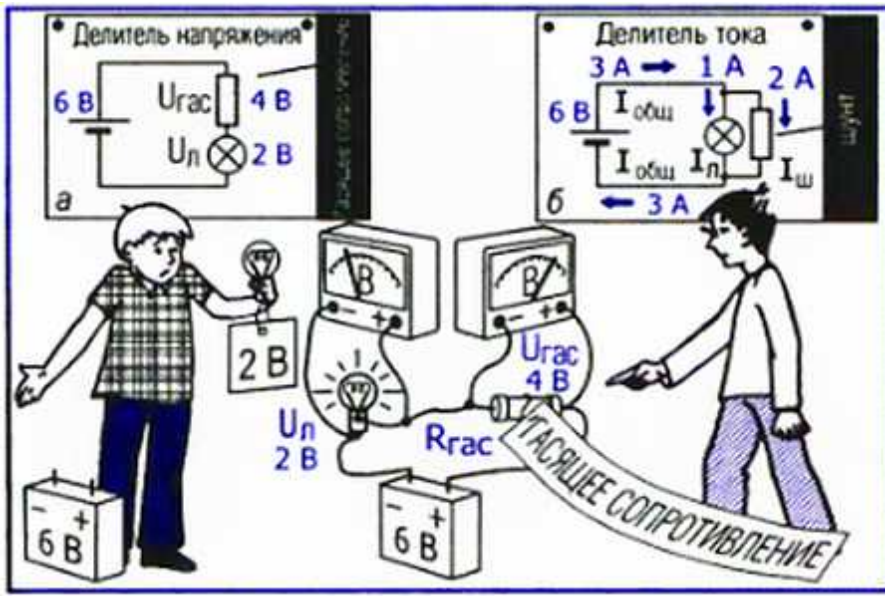


ВК-59. *При параллельном соединении сопротивлений их общее сопротивление всегда меньше наименьшего, и найти это общее сопротивление можно по формуле «произведение, делённое на сумму». Общий ток расходится по параллельным ветвям, и поэтому их называют делителем тока. Ток, который достаётся какой-либо ветви тем больше, чем меньше её сопротивление. На параллельно соединённых сопротивлениях действует одно и то же напряжение.*

Следует также отметить, что в джоулях измеряется не только работа, но и энергия. Пытаясь найти строгое, точное объяснение этого понятия, мы ещё раз обратимся к энциклопедическим словарям и обнаружим, что энергия — это «…мера движения материи», «…общая количественная мера различных форм движения материи», «…мера различных форм движения и взаимодействия», «…одно из основных свойств материи — мера её движения» и так далее. К этим глубоким, философским определениям можно добавить, что материей называют всю существующую реальность, всё, что есть в нашем мире, независимо от того, знаем ли мы об этом. Движение в данном случае тоже очень широкое понятие, оно объединяет всё, что происходит с материей. В качестве простейшего примера можно привести цепочку преобразований в карманном фонаре: химические реакции в системе «электроды— электролит» — накопление веществ с некоторым запасом химической энергии — накопление избыточных зарядов на электродах за счёт химической энергии — перемещение свободных электронов в замкнутой цепи под действием электрических сил, нагрев нити в лампочке, излучение света. Каждый из этих процессов и переход от одного процесса к другому как раз и есть пример движения в широком смысле слова.

Отложив на будущее, как это уже бывало, приятное дело «философских» размышлений, попробуем слову энергия дать объяснение менее строгое, но зато более удобное для дальнейших наших практических дел. Будем считать, что это запасённая каким-то образом способность производить работу, способность что-то делать. Имеется в виду самая разная работа, а не только поднимание бокала в момент произнесения тоста или поднятие пакета с сахаром на определённую высоту. Сами же запасы энергии могут увеличиваться или уменьшаться, энергия может пересылаться, подобно почтовой посылке, из одного места в другое. Более того, энергия может переходить из одного своего вида в другой, например, тепловая энергия может быть преобразована в энергию электрического поля, энергия поля — в

энергию перемещаемого им предмета и так далее.



ВК-60. *Чтобы уменьшить напряжение на нагрузке или ином элементе цепи, его подключают к генератору через гасящее сопротивление. Чтобы уменьшить ток через нагрузку или другой элемент цепи, параллельно ему подключают сопротивление, в которое ответвляется часть общего тока. Такой обходной путь называется шунтом, а сам процесс ответвления тока — шунтированием.*

Р-18. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД ПЕРЕДАЁТСЯ БЕЗ КАСАНИЯ. Обратившись к сложным и очень важным понятиям «электрическое поле» и «магнитное поле», мы упустили одну, казалось бы, мелочь, которую никак нельзя оставить без разъяснений. Почему вообще мелкие бумажки притягиваются к натёртым палочкам? Мы знаем, что после натирания у стекла появляется избыточный положительный заряд, у пластмассы — отрицательный (Р-1). Поэтому натёртые стекло и пластмасса будут притягивать предметы с противоположными зарядами — стекло с зарядом «минус», пластмасса с зарядом «плюс». Но какое отношение ко всему этому имеют клочки бумаги, у которых нет вообще никакого электрического заряда? За счёт чего эти электрически нейтральные бумажки тянутся к натёртому стеклу или к натёртой пластмассе?

Чтобы ответить на эти вопросы, нужно вспомнить процесс, именуемый «поляризация», это слово можно перевести как «создание полюсов». Электрический заряд натёртого стекла (или натёртой пластмассы) сначала своим полем несколько деформирует электронные орбиты атомов клочка бумаги, и на одном его конце более сильным оказывается положительный заряд (1), на другом конце — отрицательный. Вот этим своим отрицательным полюсом («минус») клочок бумаги и притягивается к натёртому стеклу, имеющему электрический «плюс». Аналогично пластмасса своим отрицательным зарядом притягивает поляризованные ею же клочки бумаги — притягивает их «плюс».

Примерно то же самое происходит при притягивании большим магнитом мелких стальных предметов, например гвоздей (2). Сначала основной магнит своим магнитным полем проводит поляризацию в мелких предметах, проще говоря, намагничивает их — поворачивает в одну сторону их элементарные магнитики, образованные особой молекулярной структурой стали. Ну а после этого основной магнит притягивает мелкие предметы — к своему южному полюсу, например, притягивает северный полюс намагниченного (поляризованного) гвоздя.

Мальчик на санках спускается с горы, не затрачивая никаких усилий, — это работает энергия гравитационного поля, Земля тянет санки с пассажиром вниз, и поэтому они двигаются по склону горки. На военных учениях выстрелила пушка, и снаряд, как всякое движущееся тело, имеет запас энергии — он израсходует её, попав в заброшенный сарай и разбросав в разные стороны куски кирпича. Движущиеся электроны, проходя по проводнику, отдают часть своей энергии, нагревая его. В самой структуре атомов и молекул запасена некоторая энергия, она может выделяться, в частности, если электрон перейдёт на более близкую к ядру орбиту. При сгорании топлива появляются молекулы с меньшим, чем «до того», запасом энергии, и высвободившаяся энергия превращается в тепло.

Если не бояться строгих критиков, то можно сказать, что энергия — как деньги: она может храниться в кошельке; может в магазине превращаться в модные кроссовки или в пирожки с капустой; может возвращаться к вам, когда кассир выплачивает вам заработную плату за отданные родному производству силы и

время.

Запасы энергии, её расход или увеличение, её количественные соотношения при переходе из одного вида в другой, затраты энергии на какую-либо работу — всё это измеряется в джоулях, как и сама работа.

Т-50. **Единица мощности — *ватт* (Вт).** Если кто-либо предложит вам электрический генератор и сообщит, что, накопив заряды на электродах, генератор может выполнить работу в 1 джоуль, то этой информации будет совершенно недостаточно, чтобы оценить предложение. За сколько времени генератор выдаёт этот джоуль? Если за секунду — неплохо, если за сотую долю секунды — ещё лучше, это значит, что генератор работает энергичнее, он быстрее поставляет заряды в электрическую цепь и может обеспечить в итоге более сильный ток. А если 1 джоуль энергии генератор выдаёт за месяц, то, значит, он работает чрезвычайно слабо, вяло и значительного тока в цепи обеспечить не сможет.

То же самое надо иметь в виду при оценке потребителей энергии. Если, например, известно, что ток, работающий в электрической лампочке, превращает в свет 100 джоулей энергии, то вы не сможете представить себе яркость лампочки. Чтобы оценить её, вам нужно ответить на тот же вопрос: «За сколько времени?», то есть вам нужно знать, за сколько времени выполняется эта работа. Если за секунду — хорошо, такая лампочка светит очень ярко. Если нужная нам работа в 100 джоулей растянута на минуту, то лампочка светит достаточно тускло. Ну а если ток, превращая в лампочке свою энергию в свет, выдаёт 100 джоулей света за час, то это уже не электрическая лампочка, а одинокий тлеющий уголёк.

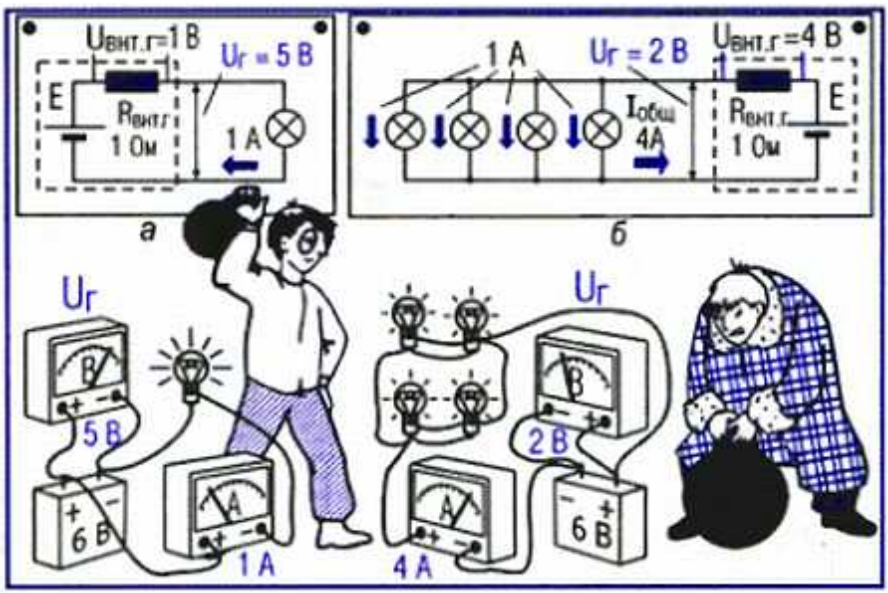
ВК-61. *Существует некоторая терминологическая путаница — словом «нагрузка» называют само сопротивление нагрузки* $\boldsymbol{R_н}$ *и также процесс отбора мощности от генератора. Поэтому надо помнить, что чем меньше сопротивление нагрузки* $\boldsymbol{R_н}$*, тем больше нагрузка на генератор — больше получаемый от него ток и, следовательно, потребляемая от генератора мощность. А выражение: «Увеличили сопротивление нагрузки» означает, что нагрузка на генератор уменьшилась, потребляемая мощность стала меньше.*

Вывод из всего сказанного очень простой: нужна ещё одна характеристика, которая расскажет о том, какая выполняется работа, но не вообще, а за единицу времени. Эта характеристика называется мощность, и используется она очень широко: представляя новый автомобиль, называют мощность двигателя, потребляемая мощность всегда указана в проспекте обогревателя или пылесоса и даже физиологи оценивают тепловую мощность, излучаемую поверхностью нашего тела.

В системе СИ единица мощности — ватт (Вт), это работа в 1 джоуль, выполненная за 1 секунду, что можно коротко записать так: 1 Вт = 1 Дж/1 с. Если работа в 1 джоуль выполняется за 2 секунды, то мощность уже меньше — всего 0,5 ватта. А если работа в 1 джоуль выполняется за 0,1 секунды, то мощность составляет 10 ватт. Одним словом, если известно, какая работа была выполнена и за какое время, то можно легко подсчитать мощность. Единица мощности названа именем изобретателя

паровых двигателей Джеймса Уатта (1736–1819) первая английская буква W его фамилии Watt в русском языке иногда представлена русской буквой В, а иногда буквой У).

Приведём ещё пару примеров, иллюстрирующих единицу мощности ватт. Если насос, подкачивая воздух в аквариум, за 5 секунд выполнил работу 80 джоулей, то за 1 секунду он наработал 16 джоулей, и мощность насоса 16 ватт (80 Дж: 5 с = 16 Дж/с = 16 Вт). Точно так же можно подсчитать производимую или потребляемую энергию. Если электрический камин за минуту выделяет 18 000 джоулей тепла, то тепловая мощность этого камина равна 300 ватт (18 000 Дж: 60 с = 300 Дж/с = 300 Вт).



ВК-62. *Электродвижущую силу* ***E*** *генератора можно измерить, если к нему не подключена нагрузка. Потому что у любого генератора при подключённой нагрузке часть э. д.с. теряется в нём самом. Такие потери отображают в виде условного внутреннего сопротивления* $R_{внт.\ г}$ *генератора, на этом сопротивлении и теряется часть э.д.с. (внутреннее напряжение* $U_{внт.\ г}$*), а на зажимах (на выходе) генератора действует оставшаяся часть электродвижущей силы — выходное напряжение генератора* $U_г$.

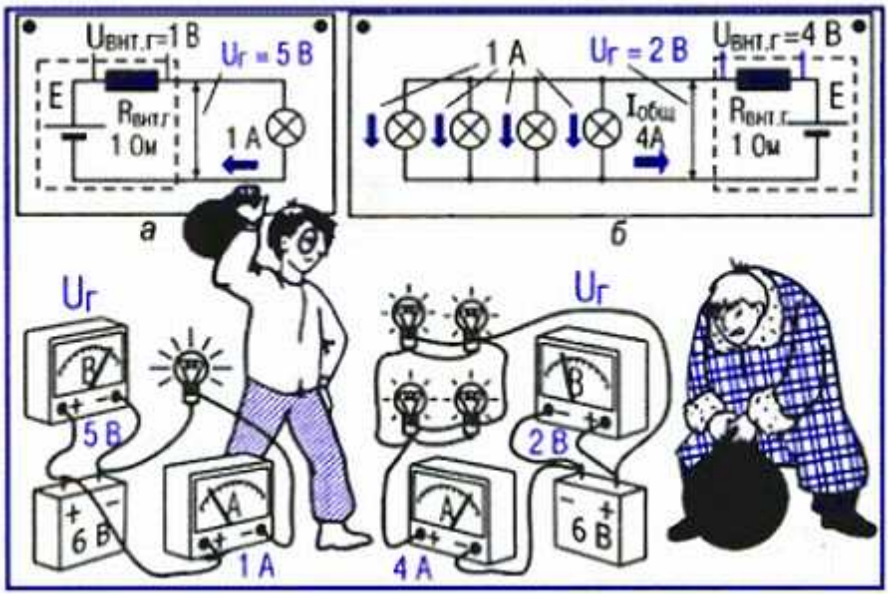
Т-51. **Иногда работу или энергию указывают не в джоулях, а в ватт-секундах или киловатт-часах.** Получив очередной счёт от вашей электрической компании, вы обнаружите, что израсходованная вами электроэнергия указана не в джоулях, а в неизвестных нам пока единицах киловатт-час.

Но это не какая-нибудь новая единица энергии, а всего лишь иное представление уже знакомых джоулей. Если какой-нибудь прибор работал 1 с, имея мощность 1 Вт, то за 1 с он выполнил работу 1 Дж. Это значит, что 1 Дж = 1 Вт·1 с, или, как иногда записывают, 1 Дж = 1 Вт-с. Вспомним, что 1000 Вт = 1 кВт (киловатт) и 3600 с = 1 ч. Отсюда получается, что при мощности 1 кВт = 1000 Вт в течение 3600 с = 1 ч потребляется энергия 3 600 000 Вт-с, или, что то же самое, 1 кВт·-ч. Единицей киловатт-час пользуются вместо джоулей в тех случаях, когда это упрощает расчёты. Так, скажем, если известно, что мощность, потребляемая из сети вашим телевизором, 200 Вт (это 0,2 кВт), то можно очень просто подсчитать, что за 10 часов он возьмёт из сети 2 кВт·ч электрической энергии.

В нескольких последних разделах мы как-то незаметно перешли к оценке работы, энергии и мощности в электрических системах, и это напоминает, что пора ввести ещё три важные характеристики этих систем: электродвижущую силу, напряжение и сопротивление.

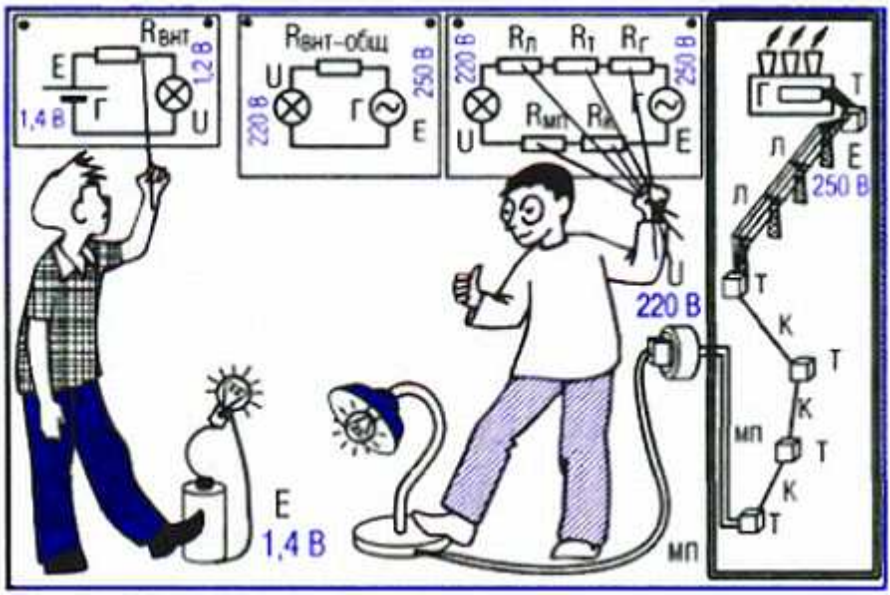
Т-52. **Единица электродвижущей силы — *вольт* (В).** Важнейшая характеристика электрических генераторов — электродвижущая сила (сокращённо э.д.с.). Электродвижущая сила, так же как и сила тока, не есть разновидность уже известной нам физической величины «сила», которая измеряется в ньютонах. Но в словосочетании «сила тока» слово «сила» вообще употребляется в сравнительно редком своём значении — так же как в выражениях «сильный дождь» или «сильное волнение». А вот электродвижущая сила (э.д.с.) хотя и косвенно, но всё же говорит о силе, например, о силе выталкивания электронов из «минуса» химического генератора. Эта сила выталкивания зависит, в частности, от типа химических реакций, от того, насколько много лишних электронов они помогают накопить в отрицательном электроде. И чем больше скопление этих избыточных электронов, тем активнее, тем сильнее они выталкивают друг друга из «минуса» во внешний мир — в электрическую цепь. В принципе силу выталкивания электронов можно было бы сделать основной характеристикой генератора. Но оказалось, что удобней и проще рассказать о том запасе энергии, который получит от генератора вытолкнутый во внешнюю цепь электрон, а значит, и о той работе, которую этот электрон сможет выполнить. Конечно, работоспособность электрона зависит от силы с которой его выталкивает «минус», но характеристика «электродвижущая сила» (э.д.с.) говорит не о силе, а именно о работе, и поэтому в единицу измерения э.д.с. входит не ньютон, а джоуль. Объяснив, что никаких нарушений в

этом нет, что всё логично и законно, сообщим результат.



ВК-63. *Часть э.д.с., которая теряется на внутреннем сопротивлении* $R_{внт.\ г}$ *зависит от величины самого этого сопротивления: чем оно больше, тем большая часть э.д.с. останется на нём, тем меньше выходное напряжение генератора* $U_г = E — U_{внт.\ г}$. *Но само* $U_{внт.\ г}$, *а значит, и* $U_г$, *зависит ещё и от потребляемого тока — с его увеличением растёт внутреннее падение напряжения* $U_{внт.\ г}$ *и уменьшается та часть э.д.с., которая достаётся внешней цепи, — уменьшается реальное напряжение генератора* $U_г$.

В системе СИ единица электродвижущей силы — вольт (В), такую э.д.с. имеет генератор, который, продвинув по электрической цепи заряд 1 кулон (К), снабдит его энергией настолько, что этот заряд выполнит работу 1 джоуль (Дж). Если генератор выталкивает заряды с такой силой, что заряд 1 К, проходя по цепи, выполнит работу 5 Дж, то, значит, э.д.с. генератора 5 В — заряды, отправляясь в путь, получают от генератора в 5 раз больший запас энергии, чем при э.д.с. 1 В. Ещё раз отметим: электродвижущая сила говорит о работоспособности, которая приходится на один кулон зарядов, проходящих по всей цепи — от «плюса» до «минуса». Коротко говоря, 1 В = 1 Дж/1 К.



ВК-64. *Электричество приходит к потребителю с электростанции длинным путём. И внутренним сопротивлением генератора приходится считать сопротивление всех участков этого пути, включая внутриквартирную проводку. Чем больше потребляемая мощность, тем больше падение напряжения на этом внутреннем сопротивлении и, следовательно, меньше напряжение, которое реально подводится к домашним электроприборам. Это иногда можно заметить по более тусклому свечению лампочек.*

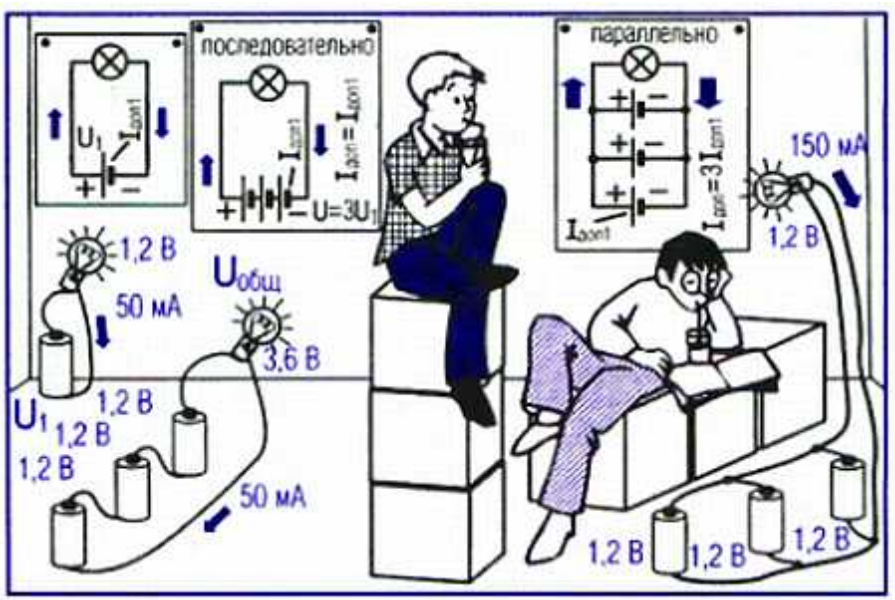
Поэтому если электричеством будет выполнена работа 1 Дж, но выполнит её уже не 1 кулон, а 2 кулона, прошедших по цепи, то, значит, ток в ней создавал генератор, имеющий э.д.с. 0, 5 В, — из наработанного одного джоуля на каждый из двух работавших кулонов приходится только 0,5 джоуля.

В определении самой э.д.с. и её единицы вольт вместо электронов упоминаются свободные заряды — это напоминание о том, что в цепи могут двигаться как свободные электроны, так и свободные ионы — положительные и отрицательные. Само же название единицы вольт напоминает нам о том, что итальянский физик и физиолог Алессандро Вольта (1745–1827) создал первый химический генератор э.д.с. и тем самым открыл новые возможности исследования электричества.

В наше время характеристика «электродвижущая сила» известна уже при разработке генератора, она, как правило, каким-то образом написана на его корпусе и указана в техническом паспорте. Этой своей характеристикой генератор как бы говорит:

«Вот что я могу делать, продвинув по цепи 1 кулон зарядов!». Ну а будет ли реализовано это «могу», сколько кулонов пройдёт по цепи и что вообще будет в ней сделано, зависит не только от генератора, зависит также и от электрической цепи, которая потребляет энергию генератора и использует её.

Т-53. **Единица электрического сопротивления — *ом* (Ом).** Существуют две характеристики, которые, по сути дела, говорят об одном и том же — о том, как сама электрическая цепь реагирует на подключение к генератору, на его стремление (Т-8) создать в этой цепи электрический ток. Один и тот же генератор, с одной и той же э.д.с., в одной цепи создаст достаточно сильный ток, а в другой — очень слабый. Всё зависит от самой цепи, от того, насколько много в ней свободных электронов, насколько часто они будут сталкиваться с атомами вещества, теряя часть своей энергии. Обо всём этом могут рассказать две совершенно конкретные количественные характеристики — электрическое сопротивление цепи и её электрическая проводимость.



ВК-65. *При последовательном соединении источников тока (генераторов) их э.д.с. суммируется, но допустимый потребляемый ток остаётся без изменений. При параллельном их соединении общая э.д.с. такая же, как у одного из источников тока (генераторов), но зато увеличивается допустимый потребляемый ток — каждый из генераторов отдаёт лишь часть довольно большого общего тока. Кроме того, общее внутреннее сопротивление становится меньше (ВК-58), и на нём теряется*

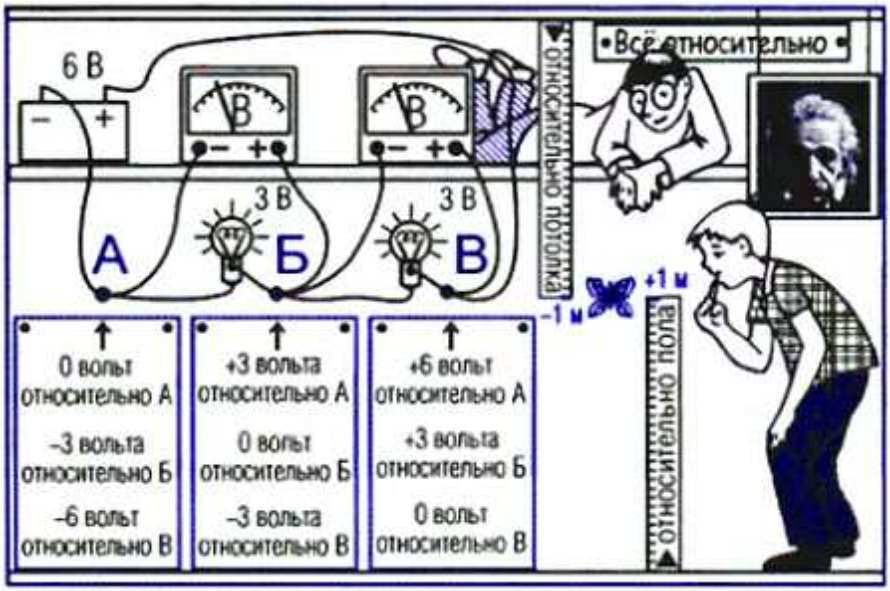
меньшая часть э.д.с.

Известная шутка рассказывает, как оптимист и пессимист отреагировали на предложенные каждому полстакана сока. Пессимист огорчился: «Дело плохо, полстакана уже нет». Оптимист обрадовался: «Ура! Пол стакана ещё есть!» Примерно так же оценивают электрическую цепь две её характеристики: проводимость говорит о том, насколько цепь содействует появлению тока, и сопротивление говорит о том, насколько эта же цепь препятствует, сопротивляется току.

В технике, в литературе можно встретить обе эти характеристики, но чаще используется одна из них — сопротивление. Кому-то покажется несправедливым говорить о сопротивлении касательно электрической цепи, которая участвует в создании тока, содействует ему. Но что поделаешь — так сложилось, да и пользоваться характеристикой «сопротивление» удобнее, во всяком случае — привычнее.

Электрическое сопротивление — характеристика и всей цепи в целом, и отдельных её участков. Сопротивление — итоговая характеристика, в ней учтено множество различных сложных процессов. Таких, например, как уход электронов с внешних орбит некоторых атомов, собственные тепловые колебания атомов и молекул, сложность атомов, из которых состоит вещество, наличие в этом веществе каких-либо примесей. Просуммировав все эти факторы, характеристика «сопротивление» говорит о том, насколько легко генератору создавать ток в данном участке электрической цепи или во всей цепи.

Даже не вдаваясь в подробности, можно представить себе, что ток создаётся тем легче, чем легче внешние электроны покидают атом и чем больше этой свободной рабочей силы блуждает в межатомном пространстве (Т-8). И ещё, ток создаётся тем легче, чем меньше размеры атома и чем дальше атомы расположены один от другого, — в этом случае электрону легче двигаться в межатомном пространстве.



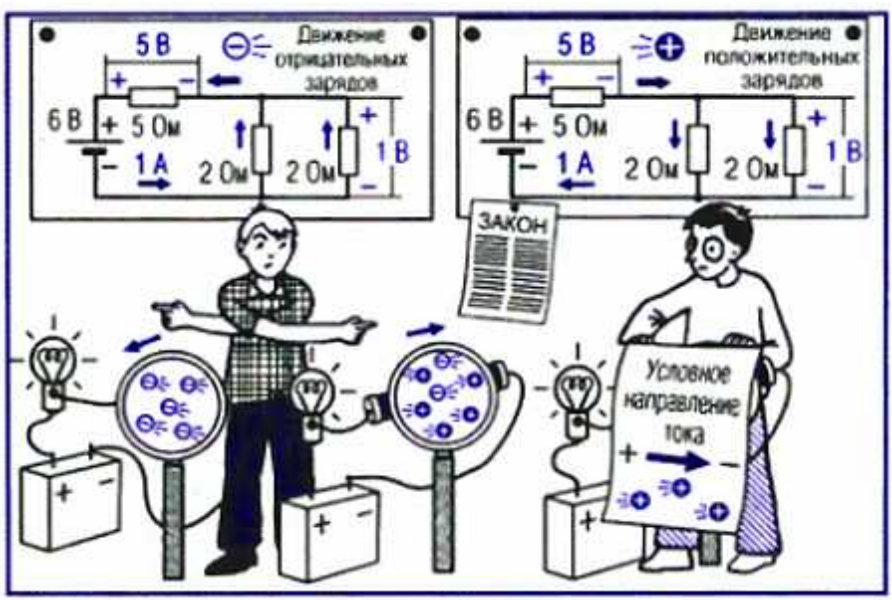
ВК-66. *При анализе событий в электрической цепи часто пользуются понятием «потенциал», имея при этом в виду напряжение в какой-либо точке относительно другой точки, обычно заранее названной. Кроме того, потенциал аналогичным способом может оценивать состояние электрического поля в определённой точке. Во всех случаях потенциал измеряется в вольтах и говорит о том, какую работу (в джоулях) может выполнить электричество, выталкивая из данной точки или притягивая к ней заряд в один кулон.*

Как мы вскоре увидим, да и по логике вещей ясно, что чем меньше сопротивление какого-либо проводника, тем легче генератору создавать в нём ток, тем больше будет этот ток при прочих равных условиях.

Единица сопротивления — ом (Ом). Это фамилия немецкого физика Георга Ома (1787–1854), исследовавшего, в частности, электрические цепи. Как видите, полное и сокращённое написание этой единицы одинаковы, но только сокращённое название согласно традиции пишется с большой буквы. Подобно единицам мощности, тока, э.д.с. и других, единица сопротивления ом тоже производная величина — она получена из двух других единиц системы СИ. Проводник имеет сопротивление 1 ом, если под действием электродвижущей силы 1 вольт в этом проводнике появится ток силой 1 ампер (в этом определении может оказаться некоторая неточность, но устранить её мы сможем чуть позже; Т-54). Если под действием э.д.с. 1 В в цепи

пойдёт ток 0,5 А, то, значит, сопротивление цепи составляет 2 Ом. А если при той же э.д.с. 1 В появится ток силой 10 А, то, сопротивление проводника составляет 0,1 Ом.

Нетрудно представить 1 Ом, так сказать, в живом виде — такое сопротивление имеет кусок медного провода диаметром ОД мм и длиной 45 см. Нить лампочки карманного фонаря обычно имеет сопротивление в несколько десятков ом, лампочки для домашней электросети — несколько сот ом, а некоторые токопроводящие детали электронных схем имеют сопротивление в тысячи и миллионы ом. В диэлектриках тоже есть какое-то количество свободных зарядов, но их настолько мало, что сопротивление диэлектрика в большинстве случаев можно считать бесконечно большим. Ну а если такой приближённой оценки недостаточно, то можно и измерить большое сопротивление диэлектрика. У пластмассового бильярдного шара, например, оно наверняка составит несколько миллиардов ом.



ВК-67. *Разбираясь в электрических или электронных схемах, удобно водить по ним пальцем, выясняя путь токов и появление напряжений на участках цепи. Так сложилось, что при разборе схем за направление тока принято не движение электронов от «минуса» к «плюсу», а сравнительно редкое движение положительных зарядов (в жидких проводниках и газах) от «плюса» к «минусу» — именно этим условным направлением тока всегда пользуются при описании схем в учебной и технической литературе.*

***Т-54*. Единица электрического напряжения — *вольт* (В).** Единицу для оценки электрического напряжения ввести нетрудно — это тот же вольт, с помощью которого мы оценивали электродвижущую силу (Т-52). Проблема в том, чтобы пояснить саму характеристику напряжение, а для этого придётся немного оглянуться назад.

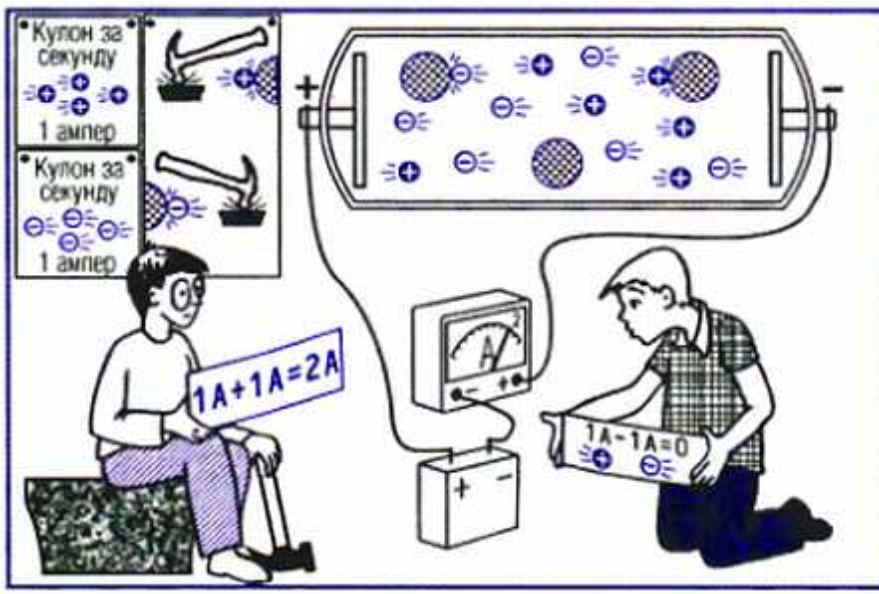
Давайте в электрическую цепь, в которой один гальванический элемент $Б_1$, включим три лампочки $Л_1$, $Л_2$ и $Л_3$, соединённые последовательно. Электроны, отправившись в путь с «минуса» батареи, последовательно проходят сначала $Л_1$,затем $Л_2$ и, наконец, $Л_3$,после чего уходят в «плюс» батареи. Будем считать, что сопротивление нити у всех лампочек одинаковое, например по 5 Ом. Процессы в этой схеме настолько интересны и важны, что вскоре мы рассмотрим их очень подробно (Т-68, Т-69). А пока вооружимся ещё незнакомым нам прибором для измерения э.д.с. — вольтметром. Для начала подключим его к самому нашему генератору — к гальваническому элементу $Б_1$. Прибор, как и следовало ожидать, покажет электродвижущую силу элемента (батареи) 1,5 В — на то он и вольтметр. Если окажется, что вольтметр покажет несколько меньшую величину, не спешите с диагнозом о его неисправности — при включении электрической цепи бывает, что некоторая часть электродвижущей силы остаётся в самом генераторе.

Теперь поочередно будем подключать вольтметр к лампочкам $Л_1$, $Л_2$ и $Л_3$ — во всех трёх случаях прибор покажет одну и ту же величину 0,5 В. Это значит, что генератор $Б_1$, продвигая электроны по цепи, поровну распределил свои усилия между тремя одинаковыми потребителями энергии (у всех трёх одно и то же сопротивление — 5 Ом). Поскольку их три и они одинаковы, то каждому досталась третья часть той энергии, которую затрачивает генератор, продвигая электроны по всей последовательной цепи. И в каждой лампочке при накаливании её нити выполняется третья часть той работы, которая выполняется во всей цепи. Зная Э.Д.С., можно сказать, что при прохождении одного кулона во всей цепи выполняется работа 1,5 джоуля, и третья часть (0,5 Дж) приходится на долю каждой лампочки. Эта третья часть общей работы и есть напряжение на лампочке. Поэтому к какой бы лампочке мы ни подключили вольтметр, он покажет 0,5 В — третью часть электродвижущей силы генератора.

Коротко говоря, напряжение на каком-либо участке электрической цепи есть часть э.д.с., которая досталась этому участку. Или, что то же самое, напряжение в вольтах — это работа в джоулях, которая выполняется на участке цепи, когда по

нему проходит заряд 1 кулон.

В заключение знакомства с первым нашим комплектом единиц измерения (метр, килограмм, секунда, кулон, ампер, ньютон, джоуль, ватт, вольт, ом) уточним, как было обещано, определение единицы сопротивления 1 ом. Чуть выше говорилось, что это такое сопротивление, в котором под действием э.д.с. 1 В идёт ток 1 А. Можно сказать об этом более спокойно: в проводнике сопротивлением 1 Ом идёт ток 1 А, если напряжение на концах этого проводника 1 В.



ВК-68. *Если ток создают оба вида свободных зарядов — положительные и отрицательные, то, определяя силу тока, нужно учитывать и те и другие. Потому что оба вида зарядов одинаково хорошо работают, упорядоченно двигаясь (хоть и в разные стороны) под действием электрических сил. И те и другие заряды ударяются о неподвижные атомы, что удобно считать причиной появления тепла. И те и другие заряды в районе химических реакций участвуют в создании электрических сил генератора.*

***Т-55*. Зноя основную единицу измерения, можно легко получить более мелкие и более крупные единицы.** В системе СИ единица длины — метр, но не очень удобно измерять в метрах расстояние между городами — получатся очень большие числа с большим количеством нулей. Неудобно измерять в метрах и размеры пылинок и песчинок или детали живой клетки — получатся десятичные дроби с большим количеством нулей после

запятой. Чтобы облегчить оценку очень больших и очень малых величин, вводятся единицы измерения, которые больше или меньше основной единицы в десять, сто, тысячу, миллион, миллиард и более раз. Названия этих новых производных единиц получают очень просто: к названию основной единицы (метр, ампер, ватт и так далее) просто добавляют приставку, такую, например, как кило- (в тысячу раз больше основной единицы), мега- (в миллион раз больше), санти- (сотая часть основной единицы), милли- (тысячная часть), микро- (миллионная часть) и так далее. В таблице на рисунке ВК-49 приведены используемые приставки и указано, как они изменяют исходную величину.

Получить большие и малые единицы измерения можно от любой основной единицы, в электротехнике микроамперы, милливольты, килоомы, мегаватты и другие производные единицы встречаются на каждом шагу.

Глава 5
Конституция электрической цепи

Чтобы найти и устранить какие-либо неполадки в электрическом аппарате или даже просто понять, что в нём происходит, нужен особый инструмент — знание основных законов, по которым живёт электрическая цепь. Понять эти законы несложно, но этого мало — их нужно прочувствовать и постепенно перенести в своё сознание. Вот почему при каждом удобном случае полезно спрашивать себя: «А почему именно так происходит? По какому такому закону?»

Для знакомства с основными законами электрических цепей нужно сделать очень небольшую, ну просто смешную предоплату — нужно научиться понимать язык очень простых алгебраических записей. Иногда их называют пугающим словом «формулы», но ничего страшного в этих записях нет. И пытаются они сделать доброе дело — чётко и без лишних слов рассказать, кто от кого и как зависит в электрической цепи.

Т-56. **Закон Ома — один из очень простых, понятных и в то же время очень важных законов электрической цепи.** Простейшая электрическая цепь карманного фонарика (Р-25), её описание и короткие рассказы о том, что в ней происходит, позволяют путём несложных размышлений выявить очень важное соотношение между э.д.с., сопротивлением и током, именно об этом соотношении как раз и сообщает закон Ома (Р-26). Вот этот закон в вольном пересказе: «Чем больше э.д.с. генератора, тем больше ток в цепи, чем больше сопротивление цепи, тем меньше ток в ней». Официальная формулировка закона Ома по смыслу говорит вроде бы то же самое, но несколько иначе: «Ток в цепи прямо пропорционален э.д.с. и обратно пропорционален сопротивлению». Как мы скоро увидим, именно в таком виде закон Ома достаточно точно описывает то, что происходит в большинстве электрических цепей.

Мы пока считаем, что в карманном фонарике только нить лампочки $Л_1$ отбирает энергию у потока электронов и, следовательно, оказывает ему сопротивление. Вполне логично предположить, что чем больше сопротивление нити, тем труднее электронам двигаться, тем меньше их успевает пройти через нить

за единицу времени и тем, следовательно, меньше ток. Отсюда вывод: чем больше сопротивление, тем меньше ток.

В то же время, если увеличить э.д.с., если батарея $Б_1$ будет с большей энергией выталкивать заряды в цепь, то интенсивность движения зарядов увеличится. Отсюда ещё один вывод: чем больше э.д.с., тем больше ток.

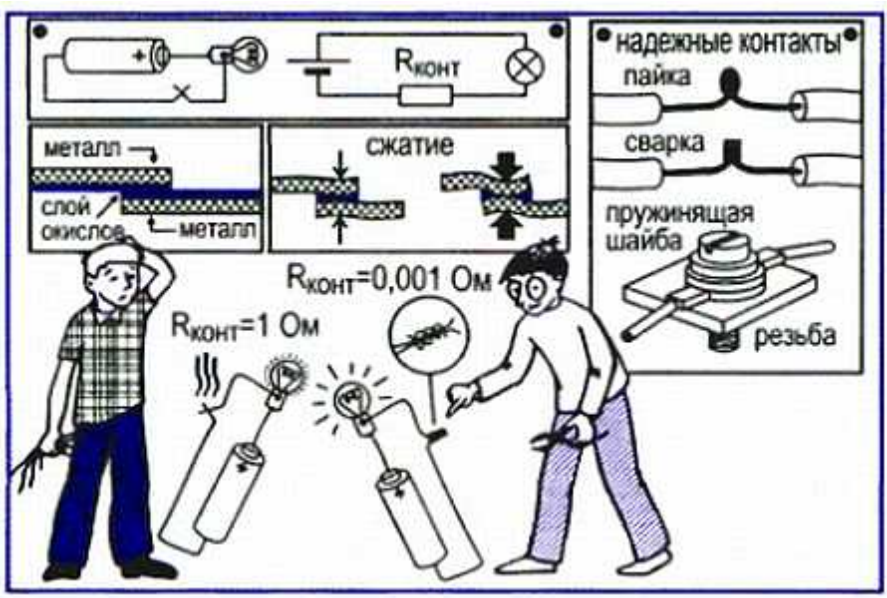
Мы рассмотрели закон Ома применительно к самой простой электрической цепи, теперь можно сделать ещё один шаг к реальности, посмотреть, как закон Ома описывает то, что происходит в цепях более сложных. Но перед этим полезно пояснить значение самого слова «закон».

Т-57. **О некотором отличии закона об охране авторских прав от закона всемирного тяготения.** Торжественные слова «закон Кулона», или «третий закон Ньютона», или «закон Ома для участка цепи» кое-кто воспринимает так, будто бы Кулон, Ньютон и Ом придумали законы, которым теперь подчиняются какие-то физические процессы и которые поэтому нужно учить и знать на экзаменах. В действительности же дело обстоит совсем не так. И вообще в выражении «закон природы» смысл слова «закон» не много имеет общего с привычным, житейским смыслом этого слова.

Когда мы говорим «закон», то чаще всего имеем в виду определённые правила, которые придумали сами люди для того, чтобы упростить и упорядочить свои отношения. Такие законы создавались ещё тысячи лет назад, например, в виде древнейших религиозных заповедей, они пытались предостеречь человека от дурных поступков, подобно тому, как сейчас это делает Уголовный кодекс.

Законы природы никто не придумывает, люди только записывают их, обнаружив эти законы в процессе экспериментов или наблюдений.

Поэтому называть законом природы принято подмеченную человеком некоторую общую, одинаковую, неизменно повторяющуюся черту в какой-то группе явлений. Так что закон природы — это как бы некоторое правило поведения физических, химических и иных природных объектов. Правило, которое действует только потому, что наш мир устроен именно так, как он устроен.

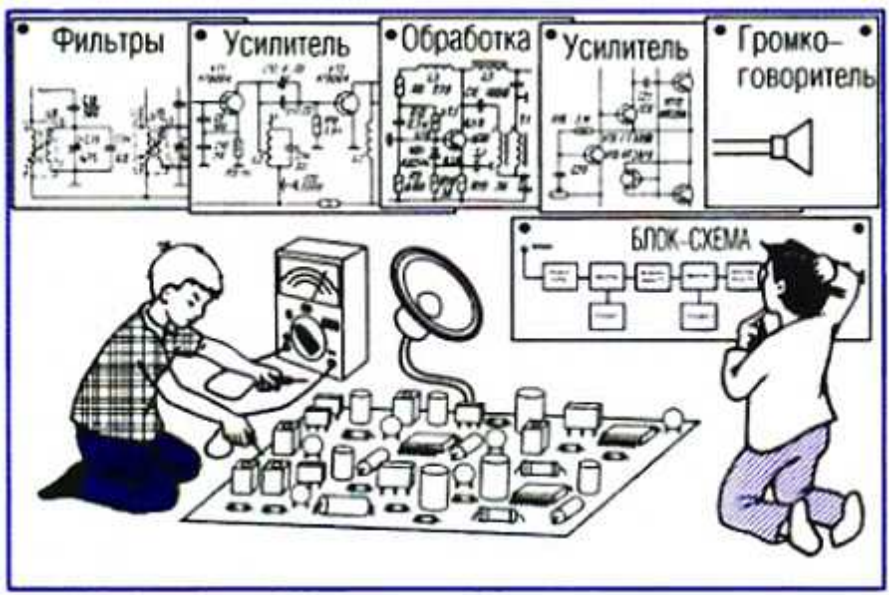


ВК-69. *Электротехнику в шутку называют наукой о контактах — недостаточно надёжный контакт непросто обнаружить, а он приводит к серьёзным неприятностям. Значительное сопротивление* $R_{конт}$ *уменьшает ток и даже иногда разрывает цепь. На этом сопротивлении теряется напряжение, выделяется заметная мощность и в итоге происходит сильный нагрев. Поэтому соединения, особенно в цепях со значительным током, осуществляют с помощью сварки, пайки или сильного механического сжатия.*

***Т-58.* Закон надо знать точно. Закон Ома не относится к числу фундаментальных законов природы.** Он рассказывает о довольно узком круге явлений в достаточно скромной системе — в электрической цепи. Рассказывает о том, как электрический ток в этой цепи зависит от действия генератора (э.д.с.) и от свойств самой цепи (сопротивление). Зависимости эти, утверждает закон Ома, очень просты: ток прямо пропорционален электродвижущей силе генератора и обратно пропорционален сопротивлению цепи (Р-16).

То, что ток должен возрастать с увеличением э.д.с., в принципе понятно, и то, что он должен уменьшаться с ростом сопротивления, тоже не вызывает сомнений (Т-56). Но заметьте, что закон Ома не просто устанавливает качественную сторону этих зависимостей, не просто утверждает, что с ростом э.д.с. ток растёт, а с ростом сопротивления уменьшается. Немецкий физик Георг Ом полтора столетия назад подметил и описал точную

количественную связь между э.д.с., током и сопротивлением — именно количественную. Он подметил, что во сколько раз возрастает э. д.с., во столько же раз возрастает ток; во сколько раз возрастает сопротивление, во столько же раз ток уменьшается. Никаких общих соображений, точно и определённо: «во сколько раз… во столько же раз…». То есть если увеличить э.д.с. в 3 раза, то и ток увеличится в 3 раза, не в 2,9 и не в 3,1, а именно в 3 раза. Точно так же, если увеличить сопротивление в 5 раз, то в те же 5 раз уменьшится ток. В этой точной количественной связи — главный смысл закона Ома и его важное практическое значение.



ВК-70. *Пытаясь найти неисправность в сложной электрической или электронной схеме, удобно не разбирать её всю целиком, а выделить в ней функциональные блоки (каждый их них делает свою работу, выполняет определённую функцию) и постараться понять, как они связаны, как взаимодействуют. После этого проще будет разобраться в том блоке, который попал под подозрение. Работа со сложными схемами требует терпения и уверенности в том, что во всём в итоге можно разобраться.*

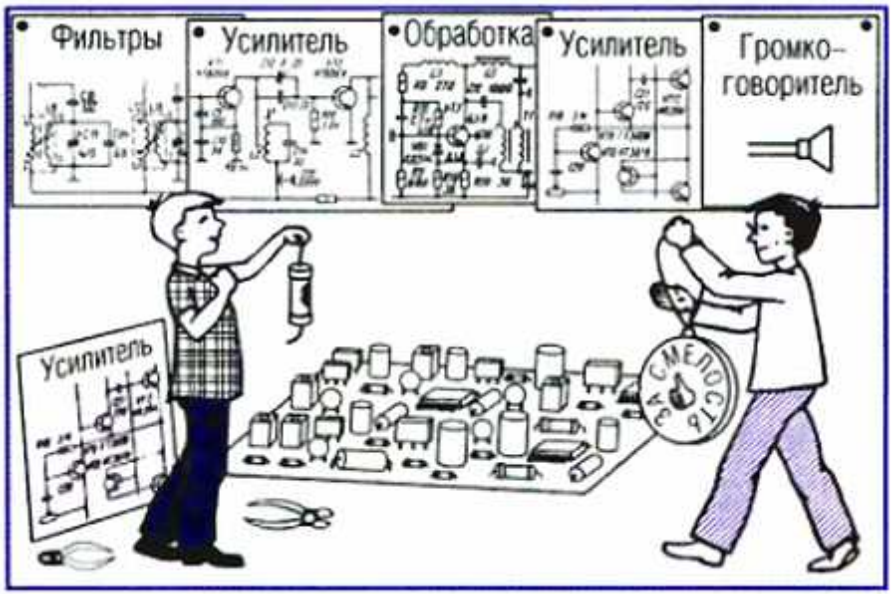
Т-59. **Формулы — чёткий и удобный способ записи влияния одних величин на другие.** Как видите, после довольно долгих размышлений мы выяснили, наконец, простую, вроде бы истину, именуемую «закон Ома».

А ведь всё, о чём говорит закон Ома, можно записать без слов — в виде короткого алгебраического выражения, на языке

простейших алгебраических формул. Ещё в предисловии говорилось, что читателю полезно будет освоить этот язык, хотя бы в минимальном объёме (Т-7). У значительной части читателей это сообщение наверняка вызвало улыбку, многие освоили этот язык ещё в школе. Поэтому можно считать, что мы займёмся всего лишь повторением пройденного, это, видимо, будет полезно для тех, кто в своё время всё это знал, но, к сожалению, подзабыл, и для тех, кто, согласно украинской поговорке, не знал, не знал, а потом ещё и забыл.

Для того чтобы представить закон Ома в виде формулы (Р-26), введём условные обозначения. Силу тока обозначим буквой *I*, электродвижущую силу — буквой *E* и сопротивление — буквой *R*. Это общепринятые обозначения, их можно встретить в самой разной литературе и документации.

Т-60. **Бегло взглянув на формулу, можно сразу увидеть, какая величина от какой и как зависит.** Формула очень короткий, лаконичный и удобный способ записи различных зависимостей. Удобство её, во-первых, состоит в том, что, одним взглядом окинув формулу, во многих случаях можно сразу же почувствовать, какая величина от какой зависит. И как зависит. Если, например, какая-либо величина в числителе, она работает на увеличение результата (как E в формуле закона Ома), если в знаменателе — работает на уменьшение (как R в этой же формуле). Другое очень большое удобство состоит в том, что простейшие алгебраические преобразования во многих случаях позволяют из одной какой-нибудь формулы получить другие, которые открывают новые возможности для понимания процесса, для его оценки или для практических расчётов.



ВК-71. *В сложной электрической схеме многие элементы могут быть самым разным образом взаимосвязаны, и, изменив какой-нибудь из них, можно обнаружить изменение режима в совсем другом, очень далёком, казалось бы, участке цепи. Это заставляет с большой осторожностью вмешиваться в работу сложных цепей, не пытаться устранить неисправность «методом тыка». Прежде чем превращать догадки в планы действий, очень полезно проверять их хотя бы простейшими измерительными приборами.*

Р-19. ОЧЕНЬ СЛОЖНУЮ РАБОТУ, ОКАЗАЛОСЬ,

ЛЕГКО ДЕЛАЕТ ХИМИЯ. Резкий поворот в изучении, а вслед за этим в использовании электричества произошёл в самом конце XVIII века, в своего рода юбилейном 1800 году. За ним начинался XIX век, обогативший человечество телефоном, телеграфом, радио, электрическим освещением и транспортом, мощными электростанциями. Итальянский физик и физиолог Алессандро Вольта создал новый источник электрической энергии по имени «Вольтов столб». Всё, что было до этого, сводилось к созданию избытка или недостатка электрических зарядов в некоторых материалах путём их натирания (Р-1). Вольтов столб мог работать часами, неделями, за счёт химических реакций поддерживая на двух металлических деталях, которые мы теперь называем электродами, избыток электрических зарядов — на одном электроде «плюс», на другом — «минус».

Возможность использовать два метала и жидкий электролит (1) в качестве принципиально нового химического генератора электрического тока А. Вольта впервые увидел в опытах физиолога профессора Луиджи Гальвани. Сам профессор, увлеченный проблемой передачи сигналов управления к мышцам, не обратил, видимо, особого внимания на эту возможность, а Вольта, потратив несколько лет на исследование и выбор металлов, предложил миру законченный вариант химического генератора (2), в котором были объединены усилия двух десятков пар электродов, каждая со своей порцией электролита. Вскоре русский физик Василий Петров построил большую батарею (4300 электродов) с напряжением до 2500 вольт (3), с помощью которой была впервые получена электрическая дуга.

Сказанное проиллюстрируем несколькими примерами, приведёнными на рисунке Р-24. Для начала здесь показано несколько разных зависимостей между тремя величинами, которые обозначены буквами *A, B* и *C*. Короткий комментарий подсказывает, как можно оценить эти разные зависимости, бросив беглый взгляд на их алгебраическую запись — на формулу.

Первые две записи (Р-24.1, Р-24.2) — очень похожи на закон Ома, величина *A* зависит от *B* и *C* точно так же, как ток **I** зависит от **E** и **R**: *A* возрастает с увеличением *B*, а с увеличением *C* падает. В следующей зависимости (Р-24.3) величина *A* точно так же

зависит от B и C, но обе эти величины находятся под квадратным корнем (это ясно видно в последнем преобразовании равенства) и поэтому слабо влияют на A: чтобы уменьшить A в 2 раза, нужно B уменьшить в 4 раза, чтобы увеличить A в 10 раз, нужно C уменьшить в 100 раз. В следующую зависимость (Р-24.4) величина B входит в квадрате (квадратичная зависимость) и поэтому сильно влияет на A: если увеличить B в 2 раза, то величина A увеличится в 4 раза, при росте B в 10 раз A увеличится в 100 раз. Если бы B входило в равенство в третьей степени (кубическая зависимость), то его влияние на A было бы ещё более сильным: увеличение B в 10 раз, например, привело бы к росту A в 1000 раз. Даже эти простейшие примеры показывают, как быстро и легко можно извлечь важную информацию о каких-либо физических и иных зависимостях, если они записаны в виде формул.

Последующие три равенства (Р-24.5, Р-24.6, Р-24.7), так же, впрочем, как первые четыре, демонстрируют, как из какой-либо формулы, предназначенной, например, для вычисления величины A, найти нужную другую величину, например B или C, которая входит в эту формулу. Разные способы математических преобразований глубоко и в большом объёме в течение нескольких лет изучаются в школе. Мы же приведём одно простое правило, которое во многих случаях позволяет преобразовать какую-нибудь формулу, чтобы получить из неё другую, более удобную. Правило это можно изложить так: «Если из формулы, которая показывает, как величина A зависит от других величин, например от B, C, D, E, вам нужно получить другую формулу, которая показывала бы, как, например, величина B зависит от всех остальных величин, то нужно одновременно с обеими частями формулы (проще говоря, с той частью, которая находится слева от знака равенства, и с той, которая справа от него) производить любые полезные, по вашему мнению, операции до тех пор, пока величина B не будет отделена от всех других величин и не останется «в одиночестве». Слова «одновременно с обеими частями формулы» выделены потому, что это важнейшее условие, нарушение которого приведёт к совершенно неверному результату. При этом слово «одновременно» ни в коем случае не следует понимать так, что оба действия нужно делать в одну и ту же минуту. В данном случае «одновременно» означает «именно с обеими частями равенства»: делишь левую часть равенства на C — раздели и правую на C; извлекаешь из правой части квадратный корень — извлеки его и из левой.

ВК-72. *Знакомство с магнитными силами, так же как с электрическими, лучше всего начать с простейших опытов. Эти опыты убедительно показывают, что магнетизм — это некая особая реальность нашего мира, что магнитные силы действуют не так, как гравитация, и не так, как электричество. Уже говорилось (ВК-15) и не раз будет повторено, что у электрических сил и у магнитных общая основа, и именуется она — «электромагнетизм».*

Электрический заряд (q) - измеряется в кулонах (Кл).
Ток (I) - измеряется в амперах (А).
Сопротивление (R) – измеряется в омах (Ом).
Электродвижущая сила (э.д.с., E) – измеряется в вольтах (В).
1
2
3
4
При токе 1 ампер через условную границу за секунду проходит 1 кулон зарядов.
1 кулон = 6,3·10^18 зарядов электрона.
Условным эталоном сопротивления в 1 ом может служить кусок медного провода диаметром 0,2 миллиметра и длиной около 180 сантиметров.
Если к генератору с э.д.с. 1 вольт подключить сопротивление в 1 ом, то по нему пойдет ток 1 ампер.

Р-20. КУЛОН, АМПЕР, ОМ, ВОЛЬТ — ПЕРВАЯ ВСТРЕЧА. Пришло время в нашем рассказе об

электричестве использовать не только слова, но и цифры — во многих случаях нам уже пора вводить количественные оценки. Вместо того, например, чтобы сказать, что по данному проводу идёт большой ток, нужно будет привести цифру и единицу измерения, которые конкретно назовут величину тока.

Начнём мы с единицы электрического заряда 1 кулон (сокращённо **К**, сам же заряд принято обозначать буквой **q**, или **Q**), названной именем французского физика Шарля Кулона (1736–1806). Заряд в 1 кулон равен 6,28 миллиарда миллиардов зарядов электрона (1). Взяв за основу кулон, нетрудно ввести единицу измерения электрического тока 1 ампер (сокращённо **А**), названную в честь французского исследователя Андре Мари Ампера (1775–1836). Если через условное пограничное сечение какого-либо проводника за 1 секунду проходит заряд в 1 кулон, то считается, что ток в проводнике равен 1 амперу (2). Сам же ток почти всегда обозначают буквой **I**. Характеристика, которая говорит о способности проводника или иного элемента электрической схемы пропускать ток, — это его электрическое сопротивление, оно обозначается буквой **R**. Единица его измерения 1 ом (сокращённо Ом), названа она именем немецкого электротехника Георга Ома (1787–1854). В качестве сопротивления 1 ом можно взять кусок медного провода диаметром 0,5 миллиметра и длиной 100 метров. И ещё одна важная электрическая характеристика — способность генератора создавать электрический ток, его электродвижущая сила, сокращённо э.д.с. (её обычно обозначают буквой **Е** и иногда пишут большими буквами — ЭДС). Единица её измерения 1 вольт (сокращенно **В**), в честь создателя первого химического электрогенератора — итальянского физика и физиолога Алессандро Вольты (1745–1827). Представить себе эту сравнительно небольшую э. д.с. можно так: если к генератору в качестве нагрузки вы подключили кусок провода сопротивлением 1 ом и по нему пошёл ток 1 ампер, то, значит, э.д.с. генератора 1 вольт (4).

Единицы измерения, полученные из собственных имен, принято писать с маленькой буквы, но в сокращённом виде — с большой, например **К**, **А**, **Ом**, **В**.

Т-61. **Из основной формулы закона Ома можно получить две удобные расчётные формулы — для вычисления э.д.с. *E* и сопротивления *R*.**

Пользуясь тем же «самодельным правилом», можно из основной формулы закона Ома получить две новые формулы (Р-26.2). Первая получается, если в формуле закона Ома обе части умножить на *R*, вторая — если обе части одновременно умножить на *R* и разделить на *I*.

Обе эти формулы получены нами с помощью математических фокусов и физического смысла не имеют, их нельзя читать так, как первую, основную формулу закона Ома: «Ток в цепи зависит от…» и так далее. Действительно, было бы смешно полученную нами первую формулу прочитать так: «Электродвижущая сила зависит от сопротивления цепи…». Электродвижущая сила — это характеристика генератора, и от сопротивления цепи она никак не зависит. Точно так же, посмотрев на вторую формулу, нельзя сказать, что сопротивление *R* нити лампочки зависит от э.д.с. *E* и тока *I*, это сопротивление прежде всего зависит от того, из какого материала изготовлена нить, от её длины и диаметра провода. Несмотря на все это, полученные из закона Ома две новые формулы очень полезны. Это расчётные формулы, которые позволяют при необходимости подсчитать неизвестную э.д.с. *E* по известным *I* и *R* или подсчитать неизвестное сопротивление *R* по известным *E* и *I*.

Т-62. **Сопротивление (резистор) — деталь, основная задача которой оказывать определённое сопротивление электрическому току.** Закон Ома подсказывает, что можно установить в цепи необходимую силу тока, создав в этой цепи точно дозированное, то есть строго определённое сопротивление. Задавшись величиной тока *I* и зная э.д.с. *E* генератора, можно вычислить это необходимое сопротивление *R* по расчётной формуле Р-26.2. В электротехнике, и особенно широко в электронике, в течение многих десятилетий использовались специальные детали, основная задача которых в том и состояла, чтобы оказывать определённое сопротивление току. Детали эти носили вполне понятное имя сопротивление, или резистор, последнее происходит от греческого слова «резисто» — «сопротивляюсь». Сейчас, правда, резисторы в виде микроскопических полупроводниковых пылинок в основном ушли в интегральные схемы, но они, резисторы (сопротивления), всё еще выпускаются и в виде отдельных (дискретных) деталей.

ВК-73. *У магнита есть две области, где магнитные силы действуют особо сильно, — это два магнитных полюса, им дали названия «северный» и «южный». Разделить магнитные полюсы невозможно, каждый кусок разломанного или разрезанного магнита тут же создаёт свои северный и южный полюсы. Магнитные свойства северного и южного полюсов чем-то различаются, это видно хотя бы потому, что одноимённые полюсы взаимно отталкиваются, а разноимённые (северный и южный) взаимно притягиваются.*

1
3
2
30
3
300 000
0,3
4
0,000 003= 3/1 000 000
5
В позиционной системе счисления о количестве представленных предметов говорит не только сама цифра (например 2 или 6 или 9), но и её место (позиция). Так, например, цифра 3 в одиночестве означает «три» (1), на втором месте (счет всегда справа налево) - «тридцать» (2), на шестом месте - «триста тысяч» (3). Несложные графические приемы позволяют теми же цифрами показывать величины меньше единицы (4,5)

Р-21. ВАЖНА, КОНЕЧНО, ЦИФРА, НО ЕЩЁ ВАЖНЕЕ ЕЁ МЕСТО. О происхождении некоторых изобретений мы лишь догадываемся, а самих изобретателей уже, скорее всего, никогда не узнаем. К числу таких изобретений относится уже давно общепринятая позиционная десятичная система счисления, в которой используют десять цифр (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8,9), и значение каждой зависит от её позиции — от того места, на котором она стоит в предлагаемом числе.

Так, одинокая тройка означает именно три каких-либо предмета, например три дома или три рубля. Но та же тройка в числе 300 говорит уже о трёх сотнях, а в числе 3000 — о трёх тысячах предметов. Достоинство позиционной системы в том, что, имея всего десять цифр, она позволяет записать и хранить весьма большие числа (3). Точно так же этими цифрами легко отобразить малые величины, пользуясь правилом записи десятичных дробей (5).

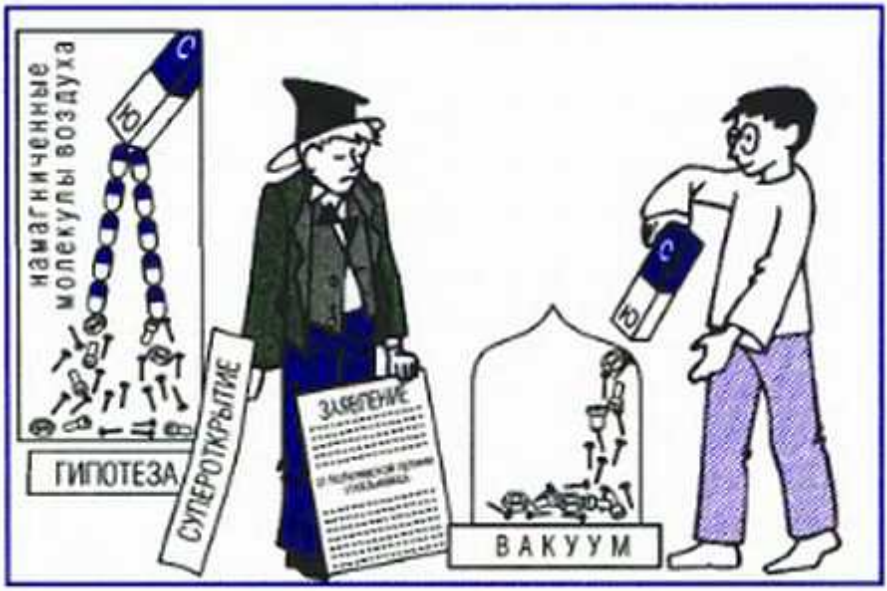
Резисторы делятся на две большие группы — проволочные и непроволочные. Сопротивление проволочного резистора тем больше, чем длиннее и чем тоньше провод, которым он намотан. А ещё сопротивление провода зависит от материала, что отражено в его удельном сопротивлении ρ. Это сопротивление куска провода длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 мм^2 или в другом стандарте сопротивление кубика с ребром 1 см (Р-40). Есть смысл внимательно посмотреть таблицу удельных сопротивлений, она может рассказать о многом. О том, например, что у некоторых металлов (серебро, медь, алюминий) количество свободных электронов и их подвижность сравнительно велики, удельное сопротивление этих металлов очень небольшое. У других же металлов (железо, ртуть и особенно некоторые сплавы, такие как нихром, константан) движение свободных зарядов затруднено самой структурой вещества, и его удельное сопротивление ρ сравнительно велико. Поэтому там, где нужно получить сопротивление поменьше, например, в обмотках трансформаторов, в разного рода соединительных проводах или в линиях электропередачи, используют медные провода или более дешёвые алюминиевые. А там, где нужно большое сопротивление, используют вольфрам (нить лампочки) или, как их называют, высокоомные сплавы.

На рисунке Р-40 в виде простой формулы показана зависимость сопротивления провода от его длины, площади

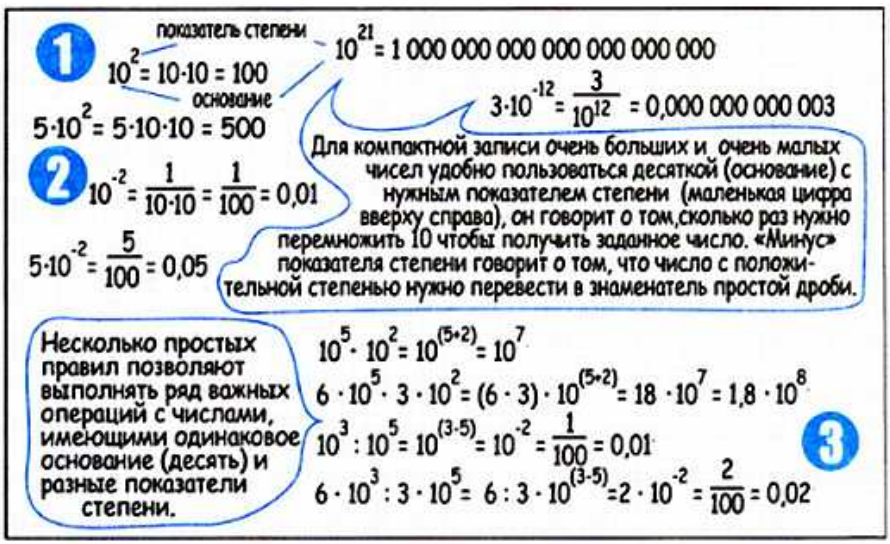
поперечного сечения и удельного сопротивления, а в таблице на рисунке Р-41 собрано уже подсчитанное по этой формуле сопротивление одного метра медного провода различного диаметра. Резистор как отдельная деталь имеет условное обозначение в виде прямоугольника, рядом с которым находится буква R, если нужно, с порядковым номером. Резисторы с небольшим сопротивлением, рассчитанные на значительную силу тока, обычно делают из высокоомного провода (нихром, константан) и нередко заливают стеклом. Резисторы с большим сопротивлением (килоомы, мегомы) из проволоки изготовить сложно, в них используют тонкие токопроводящие плёнки, нанесённые на керамическую трубочку.

Особое место занимают резисторы, сопротивление которых можно плавно менять, или, иначе, резисторы переменного сопротивления. Их сопротивление можно менять, перемещая подвижный контакт и изменяя тем самым ту часть резистора, которая включена в цепь. Проволочные переменные сопротивления принято называть реостатами.

Т-63. **В виде резисторов (сопротивлений) на схемах часто отображают самые разные приборы, аппараты и элементы цепи.** Процессы в электрической цепи никак не изменятся, если лампочку, электрическую плиту или утюг заменить резистором с соответствующим сопротивлением. Поэтому такую замену, разумеется, условную, часто производят на схемах, благодаря чему в них легче разбираться — не отвлекает разнообразие элементов и их особенности, не имеющие отношения к основным процессам в цепи. Поддерживая эту традицию, можно по-иному изобразить схему электрического фонарика, показав на ней то, на что мы раньше не обращали внимания, — сопротивление проводов и так называемое внутреннее сопротивление генератора $R_{внг}$ или $R_{внт}$ (Р-33). Это вполне реальное сопротивление, поскольку и в самом генераторе, например, в электродах и электролите аккумулятора или гальванического элемента, ток тоже теряет какую-то часть своей энергии. Обычно это очень небольшие потери, но иногда, как мы вскоре увидим, их необходимо учитывать.



ВК-74. *Магниты взаимодействуют друг с другом и с ещё не намагниченными стальными предметами, например, со стальными булавками и гвоздями. Идея о невидимых молекулярных цепочках, участвующих в этом взаимодействии, провалилась — магнит притягивал гвозди и в вакууме, где молекул вообще нет. Магнит действует своим магнитным полем, так же как электрический заряд электрическим. И вначале происходит магнитная поляризация гвоздей — магнит сначала их намагничивает, а затем притягивает.*


1
показатель степени
$10^2 = 10 \cdot 10 = 100$
основание
$5 \cdot 10^2 = 5 \cdot 10 \cdot 10 = 500$
$10^{21} = 1\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000$
$3 \cdot 10^{-12} = \frac{3}{10^{12}} = 0{,}000\,000\,000\,003$
2
$10^{-2} = \frac{1}{10 \cdot 10} = \frac{1}{100} = 0{,}01$
$5 \cdot 10^{-2} = \frac{5}{100} = 0{,}05$
Для компактной записи очень больших и очень малых чисел удобно пользоваться десяткой (основание) с нужным показателем степени (маленькая цифра вверху справа), он говорит о том,сколько раз нужно перемножить 10 чтобы получить заданное число. «Минус» показателя степени говорит о том, что число с положительной степенью нужно перевести в знаменатель простой дроби.
Несколько простых правил позволяют выполнять ряд важных операций с числами, имеющими одинаковое основание (десять) и разные показатели степени.
$10^5 \cdot 10^2 = 10^{(5+2)} = 10^7$
$6 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 10^2 = (6 \cdot 3) \cdot 10^{(5+2)} = 18 \cdot 10^7 = 1{,}8 \cdot 10^8$
$10^3 : 10^5 = 10^{(3-5)} = 10^{-2} = \frac{1}{100} = 0{,}01$
$6 \cdot 10^3 : 3 \cdot 10^5 = 6 : 3 \cdot 10^{(3-5)} = 2 \cdot 10^{-2} = \frac{2}{100} = 0{,}02$
3

Р-22. ОСОБЫЙ ПОДХОД К ОЧЕНЬ БОЛЬШИМ И К ОЧЕНЬ МАЛЫМ. Часто бывает так, что числа оказываются слишком большими, слишком многозначными. Они растягиваются на несколько сантиметров, а то и на несколько строк, и, бывает, сразу не почувствуешь, насколько мала (если записана дробь) или насколько велика представленная величина. В этих случаях удобно пользоваться компактной записью очень больших и очень малых чисел, используя в них множитель в виде десятки в той или иной степени (1). Положительный показатель степени (без знака «+») как всегда позволяет быстро и легко оценить большое число, отрицательный показатель (знак «—») переводит большое число в знаменатель простой дроби, и таким образом вся запись отображает очень малую величину (2). В связи с одинаковостью оснований (десять) с подобными записями легко проводить простейшие математические операции (3).

Т-64. **Попытка заглянуть внутрь электрической цепи, чтобы понять обстановку на границах.** Стремясь глубже понять то, что происходит в электрической цепи, можно привлечь на помощь силу воображения и мысленным взором просматривать фотографии или даже кинофильмы с участием лёгких и быстрых пылинок-электронов, неповоротливых тяжёлых ионов, неподвижных атомов, невидимых электрических полей и других положительных и отрицательных героев. Конечно, подобные картины будут страшным упрощением истины, но это не должно бросать тень на их учебную полезность (Т-8). Ведь мы знаем, что чертёж — это упрощение реальной машины, но вместе с тем мы прекрасно пользуемся чертежами, чтобы понять, как эта машина устроена.

Мысленно заглядывая внутрь элементов внешней (то есть за пределами генератора) электрической цепи, вы рано или поздно наткнётесь на вопрос: а где, собственно говоря, эта внешняя цепь начинается, где проходит её граница с генератором? Имеется в виду граница не в смысле геометрических форм, а в смысле электрического состояния.

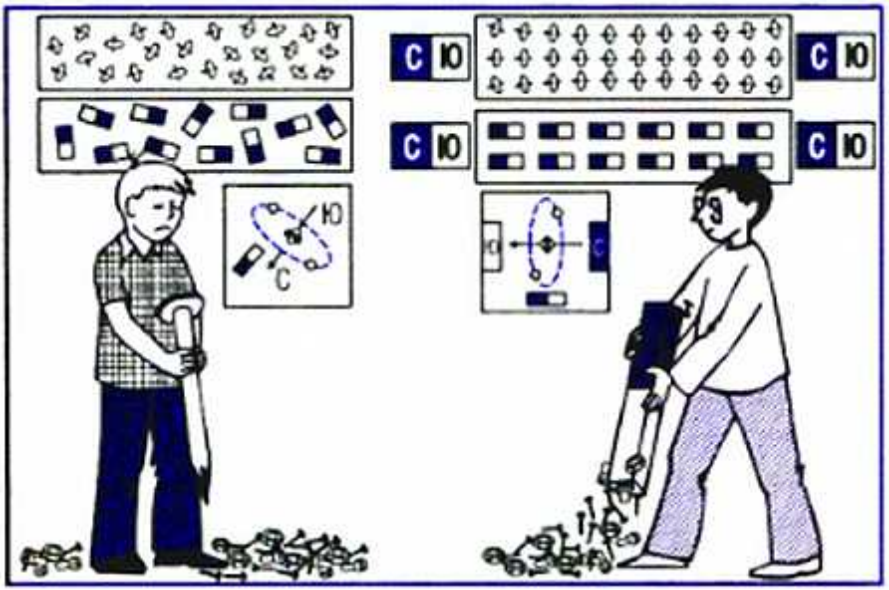
Мы знаем, что на электродах генератора скопились избыточные заряды, они-то и создают электродвижущую силу. Известно также, что в куске провода как таковом избыточных зарядов нет, свободных электронов в нём ровно столько же, сколько и покинутых ими атомов, положительных ионов. Так,

может быть, граница между электродами генератора и внешней цепью — это своего рода электрический обрыв, пропасть? Может быть, на электродах есть скопление зарядов и они ни на шаг не выходят за пределы электрода?

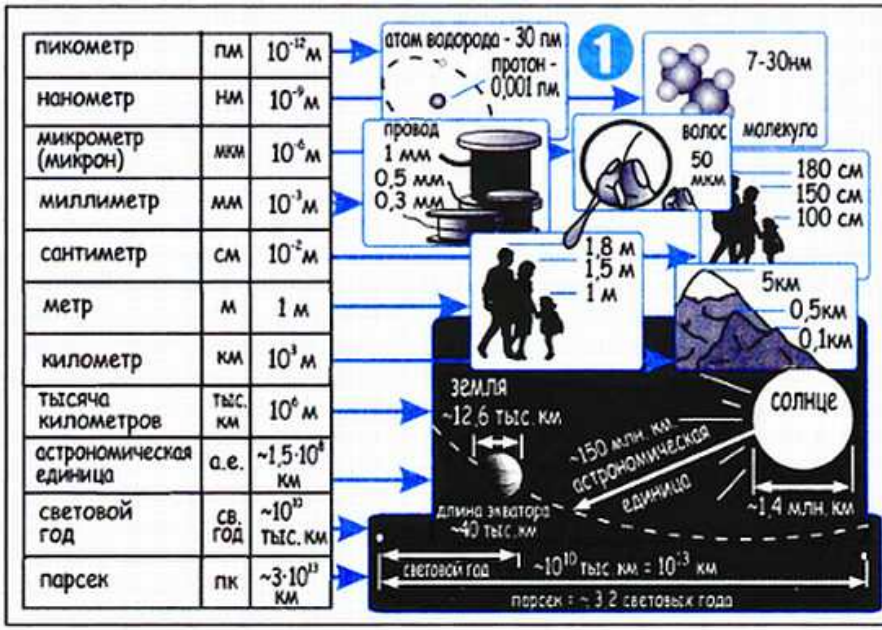
Но что же тогда будет, если и электроды, и проводник сделать из одного и того же материала и соединить сваркой? Как в этом случае заряды узнают, где кончается электрод и начинается провод? Где именно проходит та граница, через которую избыточным зарядам нельзя переступать? И как в этом случае представить себе «пограничные войска», которые смогут удержать избыточные заряды в пределах электрода?

Т-65. **Во всех участках последовательной цепи сила тока одинакова**. Одна из чрезвычайно важных особенностей всякой последовательной электрической цепи — ток во всех её участках одинаков. А иначе и быть не может. Величина тока говорит о количестве электронов, которые проходят через поперечное сечение проводника за одну секунду. Если предположить, что при переходе из одного участка в другой ток уменьшается, то на границе между участками заряды будут бесконечно накапливаться (их приходит больше, чем уходит), а это невозможно. Если же считать, что при переходе из участка в участок ток возрастает, то на границе между участками нужно как-то добавлять заряды. Но как? Откуда их брать? Так что увеличение тока при переходе из одного участка в другой тоже невозможно.

А возможно только то, с чего мы начали: по всем участкам последовательной цепи идёт один и тот же ток, сколько приходит в какую либо точку свободных электронов, столько и уходит.



ВК-75. *Для упрощения можно считать, что в некоторых веществах (например, в стали) есть микроскопические элементарные магнитики, под действием внешнего магнитного поля они поворачиваются своим северным полюсом в одну сторону, а южным — в противоположную и остаются повёрнутыми. Этот процесс называется «поляризация», она приводит к тому, что полюсы элементарных магнитиков складывают свои усилия и с особой силой действуют в тех областях, которые называют полюсами магнита.*



Р-23. ФИЛОЛОГ ВСЕГДА ПОМОЖЕТ. Хочется верить, что именно люди, глубоко понимающие возможности языка, приняли участие в создании этой системы — для любой единицы измерения применяются универсальные приставки, которые увеличивают либо уменьшают любую единицу в десять, сто, тысячу, в миллион, миллиард и в триллион раз. К таким приставкам постепенно привыкают и пользуются образованными с их помощью словами, как обычными единицами измерения. Так, уже давно стали привычными киловольт (тысяча вольт), микроампер (тысячная часть ампера), мегагерц (миллион герц — единиц измерения частоты), миллиграмм (тысячная часть грамма), нанометр (миллиардная часть метра или миллионная часть миллиметра) и т. д. Астрономам, конечно, этой таблицы не хватило, и они придумали для себя единицы измерения очень больших и очень-очень больших расстояний. Это астрономическая единица (расстояние от Земли до Солнца примерно 150 миллионов километров, то есть $1{,}5\cdot10^{8}$ километра, парсек (примерно $3{,}26\cdot10^{13}$ километра!) и световой год (примерно 10^{13} километров, или 0,3 парсека). О показателях степени (10^{13}, 10^{8} и др.) напоминает рисунок Р-22.

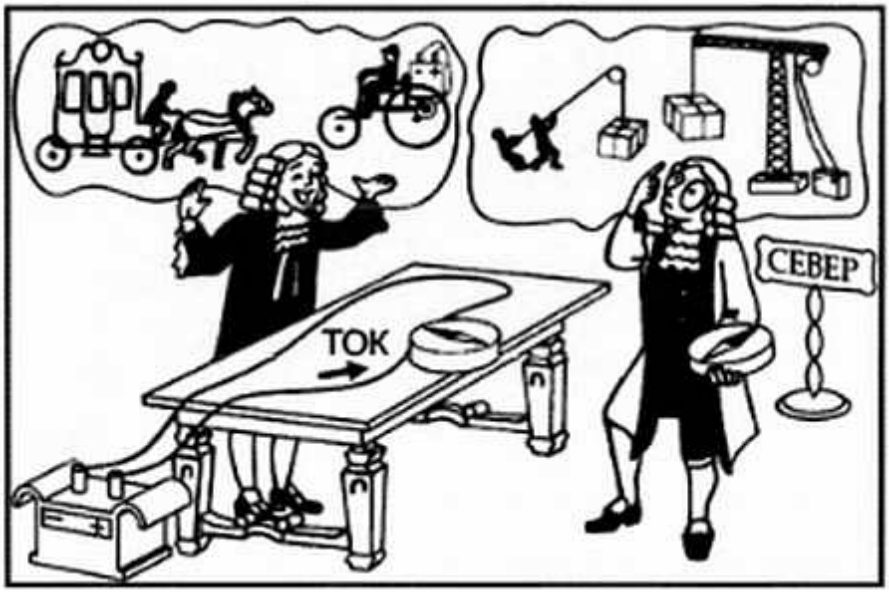
Т-66. **Забыв на некоторое время об электричестве, мы берём санки и отправляемся на поиски пригодной для спуска снежной горки.** Другая принципиально важная особенность электрической цепи связана с вопросом, который мы только что пытались обсуждать: где фактически заканчивается область со скоплением избыточных зарядов, где проходит электрическая граница между электродами генератора и проводами внешней цепи?

Разобраться в этом нам поможет довольно простая аналогия: захватив санки, мы заберёмся на высокую снежную гору и прокатимся вниз.

Прокатимся? Возможно… Но только не в этот раз. Мы подходим к краю снежной горы и вместо покатого склона видим резкий обрыв, затем совершенно ровное снежное плато и опять обрыв. О том, чтобы прокатиться на санках с такой горки, и речи быть не может, с неё можно только упасть.

Находим другой спуск, на этот раз одинаково пологий по всей его длине и при этом ровный, как доска, без единого бугорка или впадины. Спуск — то, что надо, как говорят одесситы. При внимательном рассмотрении, однако, оказывается, что и этот спуск не очень-то хорош для катания на санках: участки рыхлого снега чередуются на нём с гладким, блестящим льдом и с голой оттаявшей землёй. По такому спуску санки будут не катиться, а дергаться — по льду они помчатся быстро, по рыхлому снегу пойдут медленно, а на голой земле могут совсем остановиться.

После долгих поисков находится, наконец, горка хорошая во всех отношениях. На ней, правда, как и на предыдущей, также чередуются лед, снег и оттаявшая земля, но наклон этих разных участков тоже разный: там, где лед, — дорога пологая, где снег — наклон побольше, а там, где появилась голая земля, — спуск совсем крутой. Одним словом, там, где санкам трудней двигаться, там спуск круче. Поэтому санки, скорее всего, с горы будут спускаться ровно, с постоянной скоростью.



ВК-76. *Двести лет назад в несложных опытах было выявлено, что электрический ток поворачивает стрелку компаса, то есть создаёт магнитное поле. Так, союз электричества и магнетизма впервые показал людям, что он может работать. Прошло всего несколько десятилетий, и из глубокого понимания существа дела родились эффективно работающие электродвигатели, прародители миллионов или даже миллиардов нынешних электрических моторов, работающих в поездах метро, во фрезерных станках и в кофемолках.*

Т-67. **Созданные генератором избыточные заряды автоматически распределяются в последовательной цепи так, чтобы ток везде был одинаковым**. Три придуманные нами горки иллюстрируют три варианта распределения избыточных зарядов в электрической цепи. Первый вариант: все избыточные заряды, появившиеся в генераторе, сконцентрированы на его электродах. Этот вариант уже забракован нами — в замкнутой цепи не может быть электрического обрыва. Второй вариант: избыточные заряды равномерно распределяются по всем участкам цепи, и свободные электроны, создающие ток, на каждом из участков подталкиваются с одной и той же силой. Но такое тоже невозможно — на участках с разным сопротивлением в этом случае будет разный ток. Потому что заряды на всех участках цепи подталкиваются с одинаковой силой, а участки сопротивляются этому подталкиванию по-разному, картина напоминает горку с одинаковым по всей длине наклоном и с

участками, имеющими разное покрытие.

От неудачного второго варианта остаётся всего один шаг до следующего, третьего, который в точности соответствует действительности: избыточные заряды в реальной цепи распределяются в соответствии именно с этим третьим вариантом.

Третий вариант санного спуска (крутизна отдельных участков тем больше, чем больше трение на их поверхности) иллюстрирует точно установленный порядок распределения избыточных зарядов в последовательной цепи. До тех пор, пока генератор находится в одиночестве, пока к нему не подключена внешняя цепь, избыточные заряды сконцентрированы на электродах генератора. Но подключите к генератору внешнюю цепь, и его продукция (избыточные заряды) появится во всей цепи, распределится по различным её участкам. Причём заряды автоматически распределятся так, что на участок с большим сопротивлением придётся большее их количество. А это значит, что чем больше сопротивление участка, тем сильнее генератор будет проталкивать через него свободные электроны, и в итоге во всех участках, независимо от их сопротивления, установится одинаковый ток (Р-32.2).

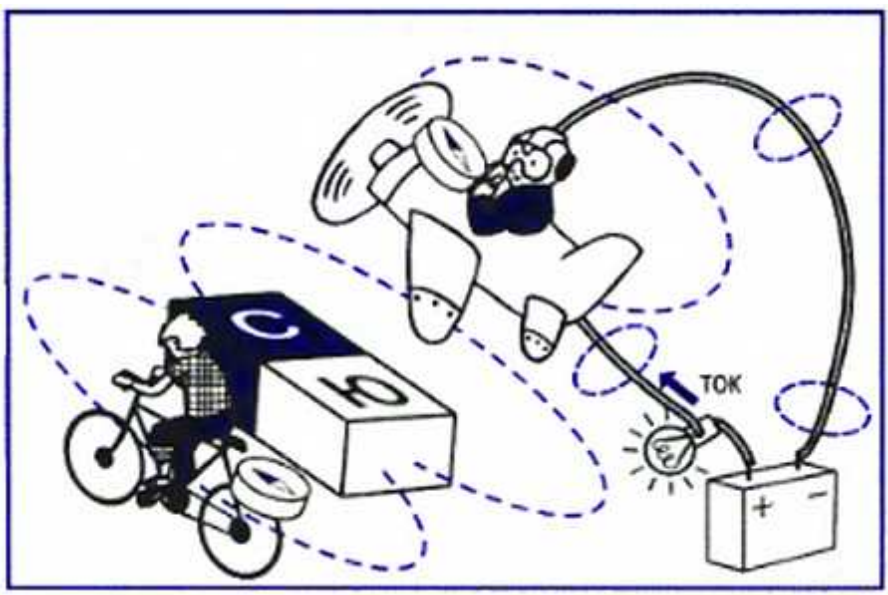
Хочется обратить особое внимание на слово «автоматически» Скопление зарядов на разных участках цепи регулируется самим током. Если вдруг в какой-нибудь точке по каким-то причинам избыточных зарядов станет чуть больше или чуть меньше, то тут же изменится и ток, он исправит нарушение баланса, добавит немного зарядов или убавит, причём всегда с таким расчётом, чтобы восстановить своё одинаковое значение во всей цепи.

ВК-77. *В простом опыте стрелка компаса отклоняется в сторону проводника, по которому идёт ток. Это значит, что магнитные свойства создают движение электрических зарядов. Почему это происходит? Почему неподвижный электрический заряд — это всего лишь электрический заряд, а движущийся — ещё и магнит? Ответ известен — так устроен наш мир. Кстати, в некоторых веществах движение зарядов создаёт «элементарные магнитики» — магнитные домены. Их поляризация и формирует постоянные магниты.*

Т-68. **Электродвижущая сила генератора делится между участками последовательной цепи, часть э.д.с., доставшаяся какому-нибудь из них, называется напряжением *U* на этом участке и измеряется в вольтах (*В*).** Теперь мы должны другими глазами взглянуть на электрическую цепь, в которой идёт ток, и пояснить то, о чём было сказано мимоходом. На каждом последовательном участке цепи, а не только на электродах генератора, есть избыточные заряды, а значит, между любыми двумя точками такой цепи действует своя собственная электродвижущая сила. Но откуда она берётся? За счёт какой энергии появляется? Это часть общей э.д.с., которую создаёт генератор. Появляется эта э.д.с. в самом генераторе и обычно за счёт использования какого-то иного вида энергии, например, в аккумуляторе или в гальваническом элементе — за счёт химической энергии. При подключении внешней цепи все избыточные заряды, поставляемые генератором, распределятся

между участками этой цепи и создадут на каждом участке его собственный филиал электродвижущей силы. Причём чем больше сопротивление участка, тем большая часть энергии генератора ему достанется, тем большая часть э.д.с. будет действовать именно на этом участке. Эта часть электродвижущей силы обозначается буквой *U* и называется напряжением на данном участке цепи.

Так же как и сама электродвижущая сила *E*, напряжение *U* измеряется в вольтах (*В*). И физический смысл слов «вольт напряжения» точно такой же, как и смысл уже знакомого нам выражения «вольт электродвижущей силы» (Т-52), — он называет работу, которую выполнит заряд 1 кулон, проходя по данному участку. Чем большую работу выполняют электроны, проходя по какому-нибудь участку последовательной цепи, тем больше напряжение на нём.



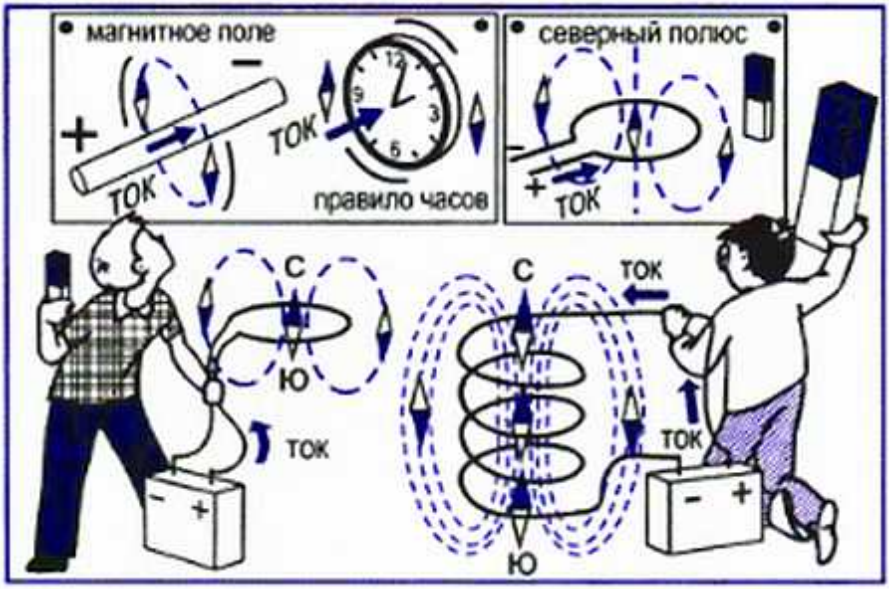
ВК-78. *Магнитное поле всегда замкнуто. Это значит, что, двигаясь в магнитном поле и ориентируясь определённым образом по стрелке компаса (она помогает двигаться вдоль линии с одинаковой интенсивностью магнитного поля), мы придём в ту же точку, из которой начали свой путь.*

Т-69. **Работоспособность (в вольтах) в какой-либо точке электрической цепи или электрического поля часто называют её потенциалом**. Само слово потенциал происходит от латинского слова «потенциа», что означает «сила, способность

действовать». Даже при упрощённом, поверхностном изучении какого-либо предмета приходится упоминать термины, без которых, казалось бы, можно обойтись, но которые, однако, нередко встречаются в литературе. К числу таких терминов относится «потенциал», он говорит об электрическом состоянии какой-либо точки электрической схемы или пространства, где действуют электрические силы. Часто можно услышать выражение «разность потенциалов», которое относится к двум тут же названным точкам. Потенциал и, следовательно, разность потенциалов измеряются в вольтах, точно так же, как напряжение или электродвижущая сила. И говорит разность потенциалов о той работе, которую сможет выполнить ток, перемещая 1 кулон электрических зарядов от одной названной точки к другой.

T-70. **На любом участке электрической цепи действует закон Ома, по сути, такой же, как закон Ома для всей цепи.** Законы любой страны в значительной своей части действуют на всей её территории, но есть и такие, которые учитывают особенности отдельных регионов, — это местные законы, непременно согласованные с законами общегосударственными. Нечто подобное можно сказать про закон Ома — он может отображать соотношение *E, R, I* для всей цепи, а также для какого-либо её участка. При этом закон Ома для участка цепи имеет некоторые местные особенности.

Напряжение *U* на участке цепи (падение напряжения) это не выдумка, помогающая что-то объяснить или подсчитать. Это реальность, которую можно измерить вольтметром и назвать местной э.д.с. Но общая э.д.с. *E* — это характеристика генератора, и ни от чего другого она не зависит, а вот напряжение *U* на участке цепи никак не назовёшь независимой величиной.



ВК-79. *Направление магнитного поля проводника определяется по правилу часов — если ток входит в циферблат, то северный полюс направлен по ходу стрелок. Если сделать из проводника с током виток, то у него появятся магнитные полюсы — северный и южный. Соединив последовательно несколько витков провода, то есть намотав катушку и пропустив по ней ток, можно получить довольно сильный магнит или, точнее, электромагнит — магнитные поля отдельных витков, по которым идёт общий ток, суммируются.*

***Т-71*. Напряжение *U* на участке цепи зависит от силы тока *I*, который проходит по этому участку, и от его сопротивления *R*.** Совсем недавно из формулы закона Ома мы получили две расчётные формулы — для вычисления э.д.с. *E* и сопротивления *R* (Р-26). И было отмечено, что это именно расчётные формулы, что истинных физических зависимостей они не описывают. Из формулы закона Ома для участка цепи можно получить две похожие расчётные формулы — для вычисления *U* и *R* (Р-31). Вторая формула (**R = U: I**), как и прежде, это всего лишь расчётная формула, поскольку сопротивление ни от напряжения *U*, ни от тока *I* реально не зависит, а зависит только от того, из чего и как сделан резистор, которым данное сопротивление представлено в схеме. А вот первая расчётная формула **U = I·R** отображает реальную зависимость, и притом очень важную. Она говорит о том, что чем больше ток, тем больше напряжение *U* на участке цепи. И это вполне объяснимо: чем больше ток, тем

большее напряжение должно его поддерживать.

Таким образом, если отвлечься от того, что происходит во всей последовательной цепи, и рассматривать только события на одном её участке, то наиболее удобной становится такая формулировка закона Ома для участка цепи: напряжение на участке цепи тем больше, чем больше его сопротивление и чем больший ток по нему идёт.

А если учитывать то, что происходит во всей цепи, то окажется, что за этим самым «…чем больший ток по нему идёт» стоят зависимости, которые иногда нельзя не учитывать. Так, например, если уменьшить какое-нибудь сопротивление R_x последовательной цепи, то уменьшится общее её сопротивление, увеличится общий ток и в полном соответствии с нашей расчётной формулой возрастут напряжения на всех остальных участках.

Вооружившись достаточно мощными средствами для знакомства с электрическими цепями, мы в дальнейшем, как правило, уже не будем прибегать к образным описаниям знакомых событий, к таким, например, как «электроны отправились в путь от «минуса» к «плюсу», «электроны с трудом проходят через сопротивление», «электроны натыкаются на неподвижные атомы», «электроны возвращаются в «плюс». Настал момент сделать небольшое усилие и перейти к иному языку, к несколько иному описанию этих событий, может быть, менее красочному, но зато чёткому, экономному и, главное, общепринятому.

Глава 6
Думайте на языке электрических схем

Невозможно представить себе химика, который не понимает язык химических формул, или конструктора самолётов, который не умеет читать чертежи. Для того чтобы разбираться в электрической технике, как уже говорилось (Т-7), нужно освоить несколько профессиональных языков, в том числе язык электрических схем. Знание языка схем — это прежде всего понимание зависимости токов и напряжений от какого-нибудь элемента, например от резистора или от конденсатора в цепи переменного тока. Размышления о такой зависимости чем-то напоминают дедуктивный метод Шерлока Холмса (дедукция — вывод, сделанный по правилам логики), позволивший великому сыщику раскрыть не одно запутанное дело. Использование языка электрических схем тоже даёт реальные практические результаты — позволяет, в частности, понять, какой именно элемент и каким образом нарушил нормальный режим цепи и что конкретно нужно сделать, чтобы вернуть режим к норме.

Т-72. **Условное направление тока — от «плюса» к «минусу».** Когда разбираешь сложную схему, то нередко в буквальном смысле слова приходится водить по ней пальцем, следить за тем, куда направляется ток, через какие элементы проходит, где разветвляется, куда в итоге попадает. Чтобы упорядочить анализ схем, чтобы их описанием все могли пользоваться без каких-либо ограничений и предупреждений, нужно знать несколько уже сложившихся и, можно сказать, общепринятых правил. Одно из них такое: при описании и разборе схем условным направлением тока считается направление от «плюса» к «минусу». Это значит, что в электрических цепях как бы создают ток и работают в нагрузке не свободные электроны, а какие-то свободные положительные заряды. «Как же так? Почему такая страшная несправедливость? — спешит возмутиться разволновавшийся читатель. — Ведь известно, что в электрических цепях ток, как правило, создают электроны, а они, конечно, двигаются от

«минуса» к «плюсу». Почему же для условного тока выбрали противоположное направление?»

Ответ содержит три аргумента.

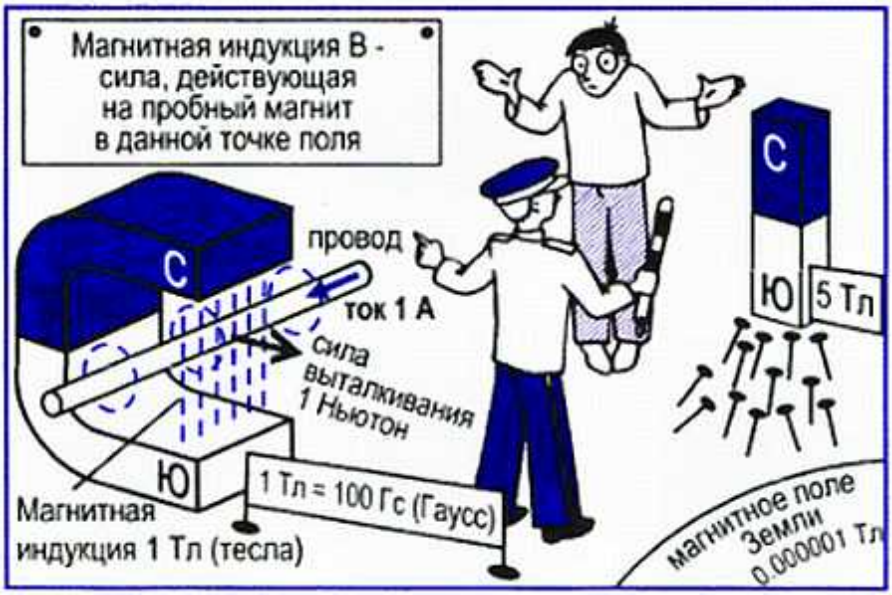
Во-первых, когда приняли условное направление тока от «плюса» к «минусу», то ещё не знали, что основные работники в электрических цепях — свободные электроны. Сейчас уже написаны тысячи книг, в том числе учебников, все их авторы согласились при разборе схем направлением тока считать «от «плюса» к «минусу», изменить эту договорённость во много раз сложнее, чем принять её.

Во-вторых, в жидких и газообразных проводниках электрический ток могут создавать не только свободные электроны, но также свободные ионы — положительные и отрицательные (Р-14). Поэтому в жидком или газообразном проводнике ток идёт одновременно в двух противоположных направлениях: свободные электроны и отрицательные ионы идут от «минуса» к «плюсу», положительные ионы — от «плюса» к «минусу». Любое из этих двух направлений можно использовать, когда водишь пальцем по схеме, пытаясь проследить, куда в ней движутся токи.

Ну и, в-третьих, условное направление тока — это всего лишь помогающий разобраться в схеме технический приём, на реальные события в цепи он, разумеется, никак не влияет. Более того, он не влияет на результат разбора схемы — где были «плюс» и «минус», там они и останутся, по каким цепям шёл электронный поток, по тем же пойдёт и условный ток, не изменятся напряжения на участках цепи, сила токов, мощность. Только пальцем вы будете водить в другую сторону, вспоминая, когда нужно, куда именно движутся электроны.

Так что раз договорились от «плюса» к «минусу», то давайте будем считать, что всё происходит именно так. А если у кого-то появится внутренний протест, то можно считать, что проводник сделан из антивещества — что у электронов положительный заряд, а у ядра отрицательный и что на «плюсе» батареи создаётся избыток этих положительных электронов, а на «минусе» их нехватка.

Кстати, электрон с положительным зарядом действительно существует, он называется «позитрон», появляется в некоторых ядерных процессах и живёт очень недолго. Но скоро вы обо всём этом не захотите думать и, следуя указаниям учебников, будете спокойно водить пальцем по схеме от «плюса» к «минусу», главным образом стараясь не сбиться с правильного пути.



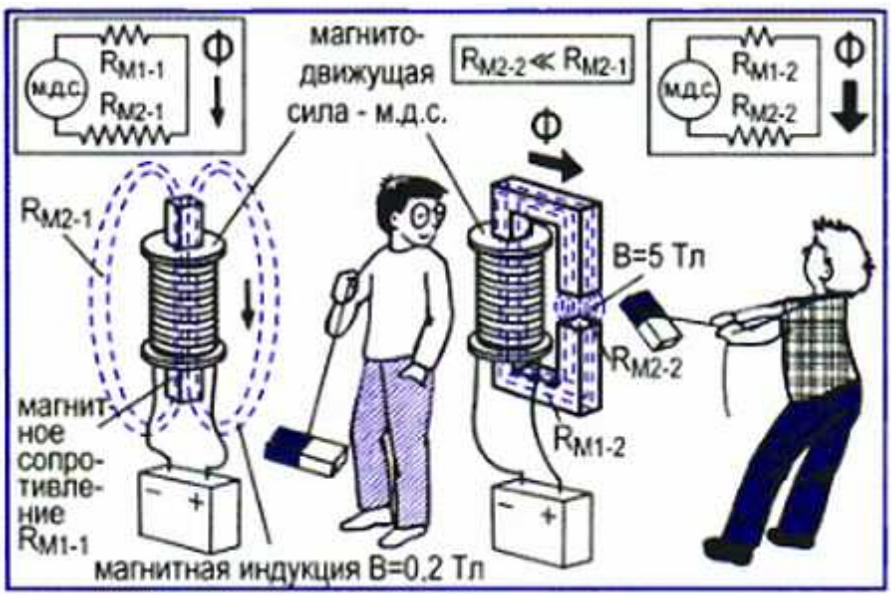
ВК-80. *Основная характеристика магнитного поля в разных объектах и в разных точках пространства — это магнитная индукция, обозначаемая буквой В. Она говорит о реальной силе, с которой магнитное поле действует на условленную порцию магнетизма. В системе СИ для оценки индукции В применяют единицу тесла, а также единицу гаусс из другой системы. Обратите внимание на очень слабое магнитное поле Земли, которое позволяет, однако, простыми приборами определять направление на Север.*

Т-73. **Определил силу тока, надо учитывать все движущиеся заряды.** Мы вспомнили о том, что в газообразных и жидких проводниках ток могут создавать как отрицательные, так и положительные заряды и что двигаются они в разные стороны. Раз уж зашла об этом речь, давайте задумаемся: а как в подобном случае определяется сила тока?

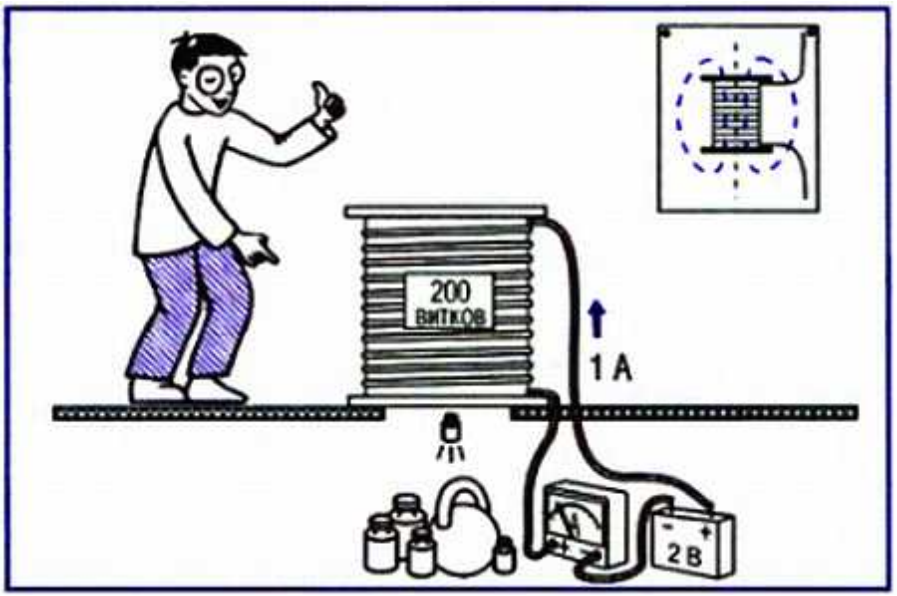
На первый взгляд может показаться, что в счёт нужно принимать разность между количеством положительных и отрицательных зарядов. Потому что одни идут туда, другие — обратно, какое движение преобладает, то в итоге и создаёт ток. Такая логика, однако, неверна — независимо от того, в какую сторону идут заряды и какие это заряды (электроны или ионы), они всегда работают. И те и другие, к примеру, в процессе своего движения ударяют по неподвижным атомам (Т-8), вырабатывают тепло, свет. Поэтому, определяя ток в цепи, где движутся разные типы зарядов, нужно учитывать общее их количество, учитывать

не разность, а сумму зарядов. Если по проводнику за 1 секунду в одну сторону прошло 6 миллиардов миллиардов электронов (1 кулон) и за то же время в другую сторону прошло столько же положительных однозарядных ионов (атомов с одним потерянным электроном, то есть с одним лишним «плюсом»), то ток составляет 2 ампера. Потому что всего через поперечное сечение проводника за 1 секунду прошёл заряд в 2 кулона — в одну сторону 1 кулон и в противоположную 1 кулон.

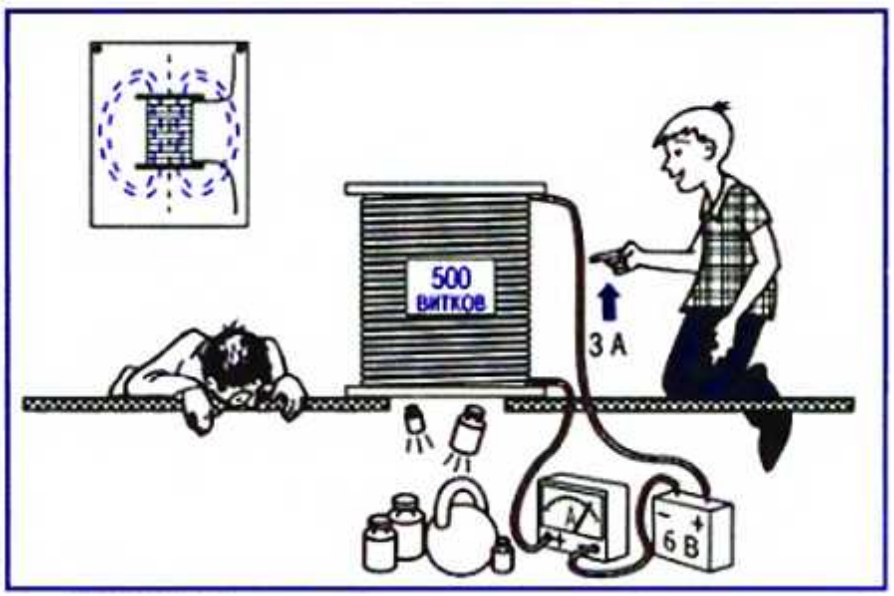
Отметив между делом этот любопытный факт, мы возвращаемся к своей основной теме — к законам электрических цепей и к процессам, которые в этих цепях происходят.



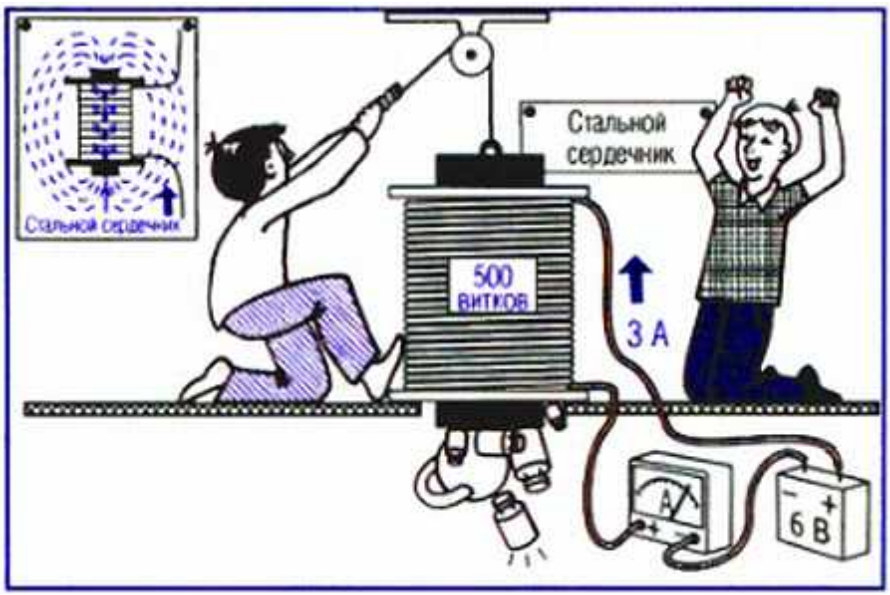
ВК-81. *Магнит и путь, по которому замыкается его поле, иногда представляют как магнитную цепь. Для неё, по аналогии с электрической цепью, введены такие характеристики, как магнитодвижущая сила м.д.с., магнитное сопротивление, магнитный поток. Для магнитной цепи существует и свой закон Ома — магнитный поток (подобие электрического тока) растёт с увеличением м.д.с. и падает с ростом магнитного сопротивления. А оно зависит от вещества, по которому замыкается поле.*



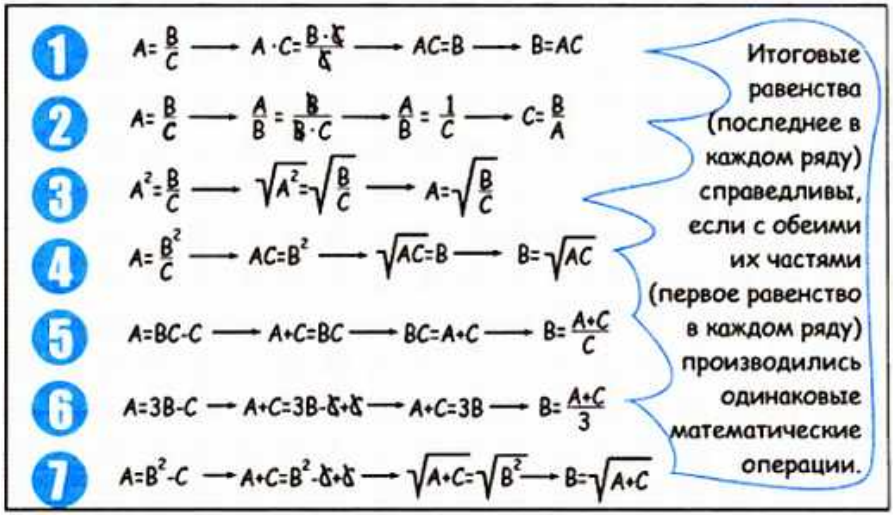
ВК-82. *Проведём три несложных исследования очень популярного электротехнического прибора — электромагнита. Пропустим по его катушке ток и убедимся, что электромагнит работает, — у него появилось магнитное поле, которое сразу же притянуло небольшую стальную гирю. Небольшую потому, что витков в катушке сравнительно немного и ток по ней пока идёт сравнительно небольшой — всё это создаёт не очень сильное магнитное поле, на одну небольшую гирьку у него сил хватило, но не более.*



ВК-83. *Теперь на старом месте (ВК-82) стоит новая катушка, в ней уже 500 витков, в то время как в первой их было всего 200. Кроме того, и ток в катушке увеличен в три раза — был 1 ампер, а стало 3 ампера. Теперь у магнитного поля электромагнита сил побольше, он поднял сразу несколько гирь, в том числе одну довольно тяжёлую.*



ВК-84. *И наконец, третий, последний эксперимент — электромагнит поднял все стальные гири, в том числе одну очень большую и, значит, очень тяжёлую. Можно отметить, что по сравнению с предыдущим опытом (ВК-83) с катушкой никаких изменений не произошло — в ней так и осталось 500 витков и ток по обмотке идёт такой же — 3 ампера. Но секрет успеха виден сразу — это вставленный в катушку стальной сердечник, который, намагнитившись, может увеличить силу магнитного поля в десятки и в сотни раз.*



Р-24. НЕЗАСЛУЖЕННО НЕЛЮБИМАЯ МАТЕМАТИКА. Тема, конечно, не для этого раздела и вообще не для этой книги. Школьники не любят математику по разным причинам, в том числе и потому, что не знают, не понимают, как много математика сделала для нормальной жизни человека. И иногда из-за этого без внимания остаются простые решения этой высокой и сложной науки, которые могли бы в трудную минуту принести пользу даже человеку без особой математической подготовки. На этом рисунке приведено несколько примеров простой задачи — у вас есть уравнение, позволяющее подсчитать неизвестную величину *A* при известных *B* и *C*. Но так случилось, что *A* вам в большинстве случаев известна, а неизвестна какая-то другая величина. Что делать? Всё очень просто — нужно так преобразовать каждое равенство, чтобы неизвестная величина осталась в них в одиночестве, и тогда её легко будет подсчитать, зная две остальные. На рисунках показано, как это делается, но, поскольку подобные задачи ещё будут вам встречаться, запомните общее правило: имея равенство, вы можете проводить с ним любые действия, но при одном условии — с обеими частями (до знака равенства и после него) одни и те же.

***Т-74.* При параллельном соединении резисторов их общее сопротивление меньше наименьшего.** Общее сопротивление последовательной цепи равно сумме всех сопротивлений —

электрический ток поочерёдно преодолевает все препятствия, и для него они в итоге суммируются. Напомним, что сопротивлением на схеме могут быть представлены самые разные элементы реальной цепи: лампочки, соединительные провода, электрические чайники, электромоторы и тому подобное. А вот если к какому-нибудь сопротивлению другое подключить параллельно, то сопротивление участка цепи уменьшится — у тока появится дополнительный путь, и двигаться зарядам станет легче. Так, например, соединить параллельно два куска провода это то же самое, что взять один кусок, но большего диаметра, а с увеличением диаметра сопротивление провода, как известно, падает.

При параллельном соединении двух сопротивлений их общее сопротивление подсчитывается по довольно простой формуле, её можно запомнить по неофициальному названию «Произведение на сумму» — имеется в виду, что произведение двух параллельно соединённых сопротивлений делится на их сумму.

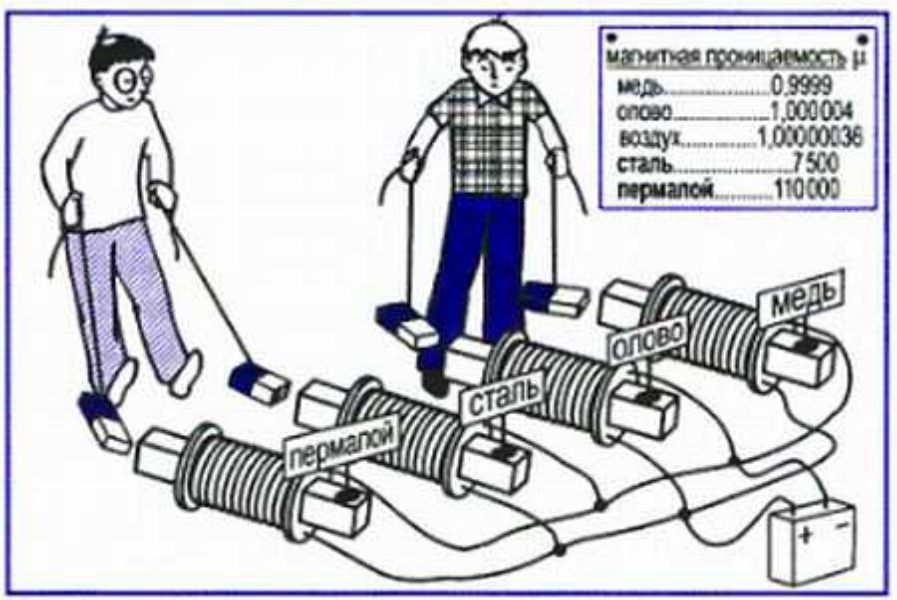
Если параллельных сопротивлений будет больше, то сначала можно подсчитать общее сопротивление двух любых, затем к этому вычисленному общему сопротивлению двойки как бы подключить третье, затем к тройке подключить четвёртое сопротивление и так далее. Конечный результат нетрудно предсказать: при параллельном соединении сопротивлений их общее сопротивление всегда меньше наименьшего.

Задача сильно упрощается при параллельном соединении одинаковых сопротивлений — в этом случае разделите любое из них на общее их число и получите общее сопротивление. Например, соединив параллельно 2 сопротивления по 100 ом, получите 50 ом, а соединив четыре таких сопротивления, — 25 ом.

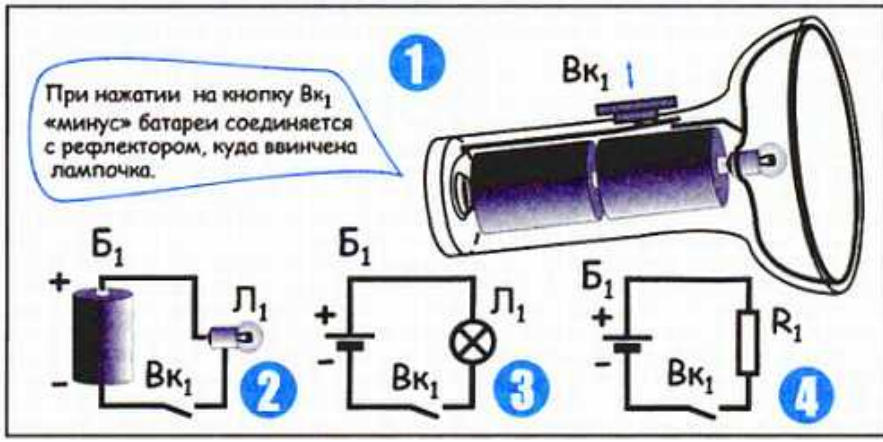
***T-75*. Мощность в электрической цепи — произведение тока на напряжение.** Мы уже встречались с этими двумя очень важными характеристиками — работой A и мощностью P в электрической цепи. Работа A, также как энергия, измеряется в джоулях (Дж), и эта единица соответствует работе силы в 1 ньютон на пути вертикально вверх в 1 метр, то есть 1 Дж = 1 Н $\cdot$ 1 м. Мощность P говорит о том, насколько интенсивно, насколько быстро выполняется работа, единица мощности 1 ватт (Вт) — это когда работа в 1 джоуль выполняется за 1 секунду, то есть 1 Вт = 1 Дж/1 с.

Сейчас мы уже в состоянии определить мощность, которую вырабатывает генератор и тратит её для преодоления какого-либо участка цепи. Что такое сила тока 1 ампер? Это когда через какой-нибудь участок цепи за 1 секунду проходит заряд в 1

кулон. Что такое напряжение 1 вольт? Это когда генератор, продвигая по выбранному нами участку заряд в 1 кулон, совершает работу в 1 джоуль. Отсюда вывод: при напряжении $U = 1$ В и токе $I = 1$ А генератор на выбранном нами участке цепи за одну секунду выполняет работу в 1 Дж. Или скажем иначе: на каждый кулон приходится работа 1 джоуль и за секунду генератор отправляет на работу 1 кулон. А если напряжение окажется в 2 раза больше, то работа по продвижению каждого кулона возрастёт вдвое и мощность увеличится тоже в 2 раза. Точно так же мощность увеличится во столько раз, во сколько раз возрастёт ток, то есть возрастёт число работающих кулонов. Коротко говоря, мощность в ваттах, потребляемая участком цепи, это произведение напряжения на этом участке цепи в вольтах на протекающий по нему ток в амперах, то есть $\mathbf{P = U \cdot I}$.



ВК-85. *Все вещества по их поведению в магнитном поле делятся на три группы — диамагнитные, парамагнитные и ферромагнитные (от слова «феррум» — «железо»). Первые две группы практически безразличны к магнитному полю — диамагнитные вещества на малые доли процента его ослабляют, парамагнитные — столь же незначительно усиливают поле. А вот ферромагнитные вещества, попав в магнитное поле, сами намагничиваются, и в итоге поле становится во много раз сильнее.*



Р-25. НАША ПЕРВАЯ НАСТОЯЩАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МАШИНА. Вот мы, наконец, добрались до настоящего, работающего электрического прибора по имени «фонарь». Питание он получает от двух последовательно соединённых элементов, и таким образом к лампочке подводится напряжение около 3 вольт. При этом лампа горит достаточно ярко, её нормальное напряжение 3,5 вольта, и многие типы элементов почти столько же могут дать ей. Лишь к концу срока службы (а у некоторых элементов также из-за длительного хранения) заметно увеличивается внутреннее сопротивление элементов, на них теряется всё большая часть э.д.с., лампочкам достаётся всё меньше и меньше напряжения и они светят все слабее и слабее.

Теперь о мощности, потребляемой от генератора.

Напряжение на выходе генератора $U_г$ — не что иное, как часть э.д.с. E, действующая на выходе генератора, на его выходных клеммах. Общий ток, который генератор создаёт во всей схеме, обозначим так — $I_{общ}$. С этими обозначениями мы легко запишем общую мощность $P_{общ}$, которую должен развивать генератор, для того чтобы все элементы подключённой к нему сложной цепи получали то, что им нужно для нормальной работы, — часть общей мощности $\mathbf{P}_{общ} = \mathbf{U}_г \cdot \mathbf{I}_{общ}$.

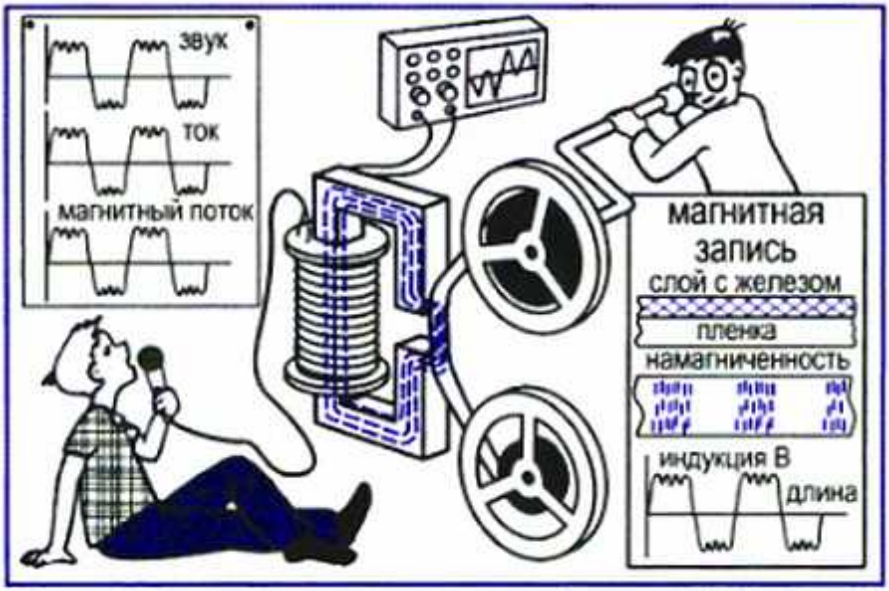
Несколько сложнее и при этом, возможно, интереснее может определяться мощность в каком-нибудь участке сложной цепи, хотя и здесь она, как всегда, равна произведению тока I и напряжения U на этом участке ($\mathbf{P} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{I}$). В формулу мощности вместо напряжения на участке цепи U можно подставить его

значение, взятое из закона Ома для участка цепи, $U = I \cdot R$. После этой подстановки окажется, что мощность зависит от тока в квадрате $P = I^2 \cdot R$, если в каком-либо участке цепи каким-то образом увеличить ток в 2 раза, то мощность возрастёт в 4 раза. Дело в том, что ток, образно говоря, двумя рычагами воздействует на величину мощности: в 2 раза мощность возрастёт за счёт увеличения самого тока и ещё в 2 раза за счёт того, что с увеличением тока, согласно закону Ома, возрастает и напряжение на участке цепи.

Точно так же, воспользовавшись расчётной формулой закона Ома, можно показать, что мощность зависит от квадрата напряжения, $P = U^2/R$. Из всех этих простых формул можно получить очень удобные расчётные формулы, одна из них позволяет по известной потребляемой мощности какого-либо прибора подсчитать потребляемый им ток. Нетрудно, например, прикинуть, что через лампочку мощностью 60 Вт для сети 220 В идёт ток около 0,3 А. Ну а зная напряжение и ток, можно при необходимости по расчётной формуле, полученной из закона Ома, подсчитать сопротивление участка цепи $R = U/I$, окажется, что сопротивление 60-ваттной лампочки более 700 Ом, а 100-ваттной — около 500.

Ещё раз отметим, что сама эта характеристика «мощность» может относиться и к генератору, и к нагрузке, и к любому другому элементу цепи. Мощность генератора говорит о том, какую работу он может выполнять в электрической цепи каждую секунду. Мощность, которая указана на приборах, потребляющих энергию, это то, что в нормальном режиме может переварить этот прибор, использовать для какого-нибудь полезного дела. Например, если на лампочке написано «100 Вт», это значит, что каждую секунду она может превращать в свет (и, к сожалению, в тепло) 100 джоулей электрической энергии. А если подвести к такой лампочке мощность побольше, увеличив, например, напряжение, то лампочка с ней просто не справится и выйдет из строя. Количество тепла, выделяемого в лампочке, недопустимо возрастёт, температура нити превысит расчётную величину, нить в своём наиболее тонком месте расплавится, и в цепи появится разрыв — лампочка, как говорят в таких случаях, перегорит.

Мощность, указанная на корпусе резисторов, также предостерегает от нарушения теплового режима — если превысить допустимую мощность, резистор может перегреться, его проводящий слой разрушится (это заметно внешне — чернеет окраска корпуса), и деталь выйдет из строя.



ВК-86. *Аппарат для магнитной записи звука это прежде всего небольшой электромагнит — записывающая головка. В его сердечнике сделана тонкая щель — зазор, к нему прилегает и равномерно движется магнитная лента. По катушке электромагнита идёт меняющийся ток, электрическая копия звука, который нужно записать. Магнитное поле сердечника замыкается не через зазор, а через прилегающую к нему ленту с ферромагнитным слоем. Её остаточная намагниченность и есть запись изменений тока, то есть запись звука.*

Р-26. ЗАКОН ОМА. Есть несколько важных и полезных соотношений, замеченных в опытах с электрическими цепями. Первым и особо важным

принято считать соотношение (1), которое в 1827 году обнаружил и объяснил немецкий физик Георг Ом, оно и носит его имя с почётным титулом «закон» — закон Ома. Это соотношение отмечает, как в электрической цепи связаны получаемая от генератора электродвижущая сила (её принято обозначать буквой **E**), созданный генератором в этой цепи ток **I** и общее её сопротивление **R**, которое может быть образовано многими сопротивлениями, соединёнными последовательно или параллельно. В главной формуле закона Ома (1) чётко обозначена связь между этими величинами, и здесь же видна обнаруженная Омом прямая пропорциональная их зависимость: увеличиваем э.д.с. **E** в 5 раз — и ток **I** возрастёт тоже в 5 раз, увеличим сопротивление **R** в 2 раза — и в те же 2 раза уменьшится ток **I**. О самой этой прямой пропорциональности (во сколько раз — во столько же раз) часто не вспоминают, считая, видимо, её обычным, нормальным явлением и отмечая лишь вполне возможную зависимость иного рода, например, увеличиваем э.д.с. в 5 раз, а ток, ранее тоже возраставший в 5 раз, на этом участке возрастает в 3 раза или вообще не меняется (Р-103).

В конце этого рисунка приведено несколько конкретных примеров (3), показывающих, как работает закон Ома, как по его формуле при изменении **E** или (и) **R** легко подсчитать ток **I** в цепи.

Кроме того, пользуясь уже знакомым нам правилом (Р-24), из главной формулы закона Ома получены две расчётные формулы (2), позволяющие подсчитать **E**, если известны ток и сопротивление цепи, и подсчитать **R** по известным току и э.д.с.

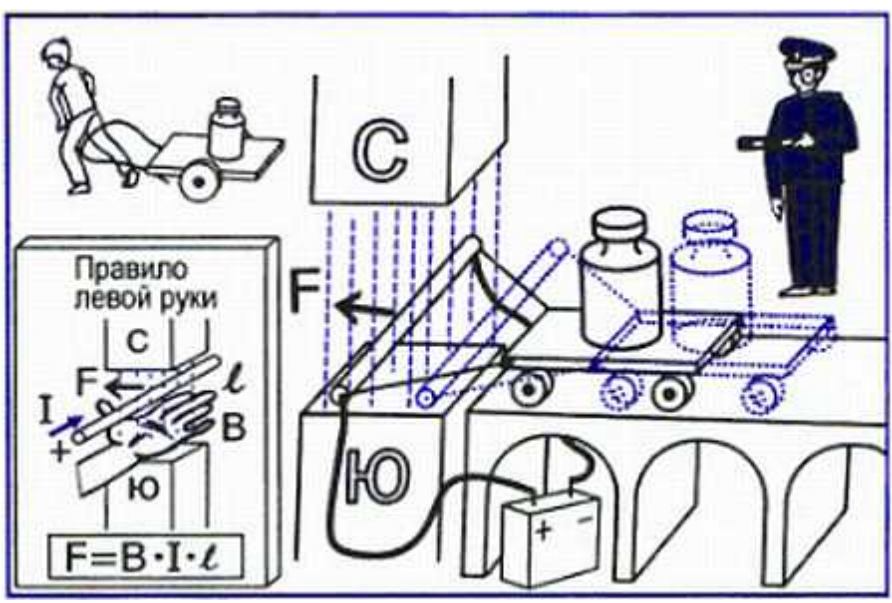
Т-76. **Несколько полезных грамматических правил для языка электрических схем**. Закон Ома для всей цепи и закон Ома для отдельных её участков можно назвать частью грамматики языка электрических схем. Если понадобится, эта грамматика поможет наглядно представить себе многие невидимые процессы, которые происходят в электрических цепях. Есть, правда, электрические цепи, которые не подчиняются закону Ома, но это, как говорится, совсем другая история, и о ней пока можно не вспоминать.

К первым двум «грамматическим правилам» можно добавить ещё два — это, как их называют, законы Кирхгофа, о сути которых

уже говорилось, правда, без их официального названия. Первый закон Кирхгофа говорит о том, что сумма всех токов, которые приходят в какую-либо точку цепи, равна сумме токов, которые из неё уходят. Иначе и быть не может — если зарядов приходит больше, чем уходит, то, значит, заряды будут бесконечно накапливаться в этой точке цепи, что, как мы уже давно поняли, невозможно. Второй закон Кирхгофа говорит о том, что сумма всех напряжений на участках цепи равна электродвижущей стиле, которая эту цепь кормит (Т-8). Это тоже не вызывает сомнений — напряжения на участках фактически есть сумма распределившейся между ними э.д.с.

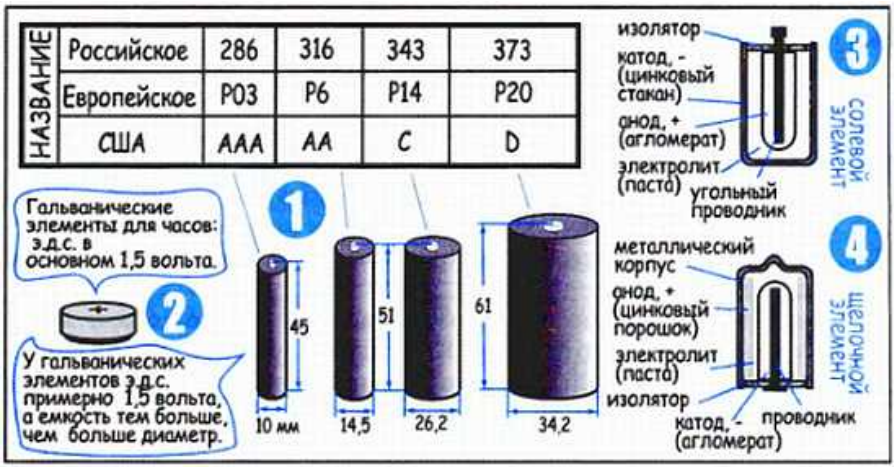
Ещё два полезных соотношения — они показывают, чему равно общее сопротивление при последовательном и параллельном соединении. К этим первым нашим «грамматическим правилам» добавим ещё три: зависимость мощности от тока и напряжения (совместно) и квадратичная зависимость мощности от тока или от напряжения.

Получившийся комплект позволит разбираться в достаточно сложных электрических цепях.



ВК-87. *Работа электродвигателей основана на выталкивании проводника с током из магнитного поля. Это взаимодействуют два магнитных поля — внешнего магнита и проводника, по которому идёт ток. Сила выталкивания* ***F*** *растёт с увеличением тока* ***I*** *и индукции* ***B*** *внешнего поля. Направление силы* ***F*** *определяется по правилу левой руки — если её ладонь обращена к*

северному полюсу магнита, а вытянутые четыре пальца указывают направление тока, то отогнутый большой палец покажет направление силы ***F****.*



Р-27. ОТДАЛ ВСЁ, ЧТО БЫЛО, И ВЫШЕЛ ИЗ ИГРЫ. Гальванический элемент — типичный химический генератор электрической энергии. Основные его детали — два электрода и контактирующий с ними жидкий или чаще пастообразный электролит. Энергия химических реакций между электролитом и электродами затрачивается на то, чтобы на одном из электродов появился и сколько можно оставался там избыток электронов (катод, электрод «—»), а на другом электроде их нехватка, то есть избыток положительных зарядов (анод, электрод «+»). Выводы электродов «+» и «—» во внешний мир — это есть выводы самого генератора, на них действует его электродвижущая сила и к ним можно подключать внешнюю цепь с нагрузкой $\mathbf{R}_н$. Уже больше 100 лет миллионными тиражами выпускаются самые дешёвые солевые элементы, их электролит — превращённый в пасту раствор соли. В последние годы хорошим спросом отмечены тех же размеров (1) щелочные элементы (на них обычно крупная надпись «алкалайн»), некоторые параметры которых заметно лучше, особенно при низких температурах.

Гальванические элементы — приборы одноразовые. С течением времени растут внутренние потери энергии в самой химической системе, они пожирают всё большую часть э.д.с., и всё меньше напряжение, которое достаётся

нагрузке (Р-32). Элемент со временем приходит в негодность, наступает пора выбросить его и заменить новым. Фирмы почему-то не публикуют столь важную характеристику своих изделий, как ёмкость — общая электрическая энергия, которую от них можно получить. Поэтому мы можем привести не более чем случайно попавшуюся или (и) подсчитанную величину — примерное количество часов, которые данный элемент будет работать, отдавая ток 20 миллиампер: AAA — 50, AA — 130, C — 400, D — 700 часов.

Т-77. **Несколько полезных образов для языка электрических схем.** Пытаясь понять, что происходит в какой-нибудь электрической схеме, мы, конечно, думаем словами, такими, например, как «напряжение», «свободные электроны», «ток», «сопротивление», «минус батареи» и так далее. Но при этом мы очень часто думаем и образами, как бы целыми картинами, на которых упрощённо видим детали схемы, их соединения и даже то, что в них происходит. Картины эти не очень точные, а иногда очень неточные (Т-8), но они удобны для размышлений.

Вспомним несколько образов, которыми мы уже пользовались в предыдущих разделах, размышляя об электрических схемах на языке электрических схем.

1. Электричество — особое свойство веществ нашего мира, оно двигает предметы, проявляя свою особую электрическую силу, подобно тому, как масса проявляет гравитационную.

2. Две разновидности электрического заряда, которым почему-то дали названия «плюс» и «минус». Заряды одного и того же знака терпеть не могут друг друга (Т-8) и взаимно отталкиваются, заряды разного знака один к другому тянутся — так устроен наш мир.

3. Три основные атомные частицы — электроны с электрическим зарядом «-», а также собранные в ядро протоны с зарядом «+» и нейтроны вообще без электрического заряда.

4. Электроды генератора — обычно две металлические детали, на одной избыток электронов («минус»), на другой их нехватка («плюс»).

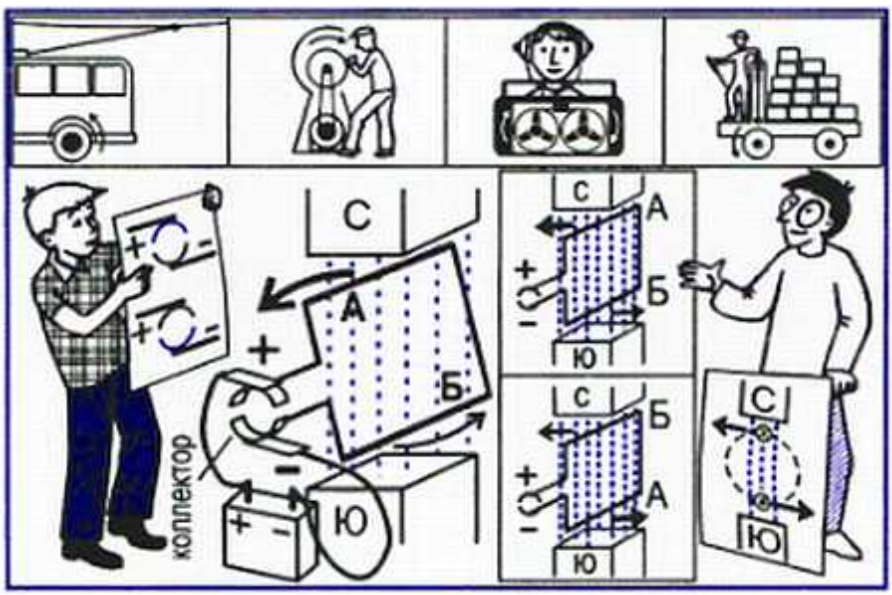
5. Химический генератор, например гальванический элемент, — скопление электронов (электрод «минус») и их нехватка (электрод «плюс») появляются за счёт энергии заранее подготовленных химических реакций.

6. Проводник — вещество из атомов, у которых некоторые электроны вырвались на свободу и в огромном количестве

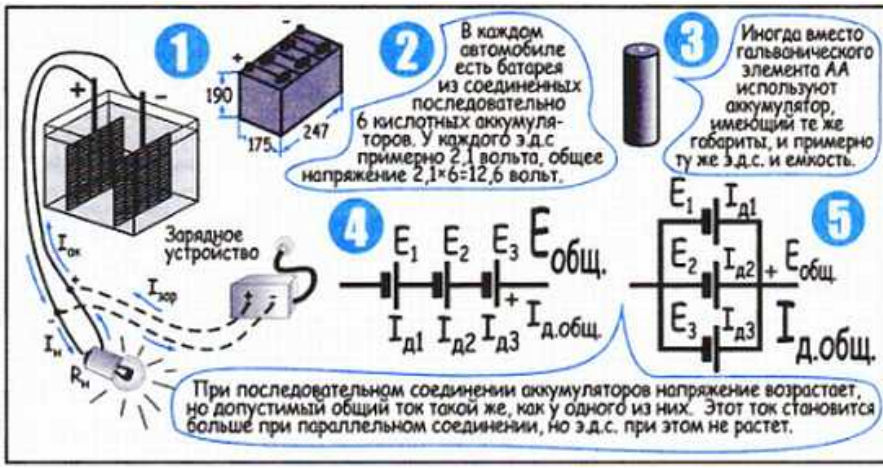
свободно блуждают в межатомном пространстве. Электронов настолько много, что по отношению к ним часто применяют словосочетание «электронная пыль».

7. «Плюс» и «минус» генератора соединены двухпроводной токопроводящей линией с нагрузкой — с электрической схемой, которая, используя полученную энергию, выполняет определённую работу, нужную человеку.

8. Электроны выталкиваются из «минуса» генератора и по проводящей цепи продвигаются к «плюсу», где их не хватает. Это и есть электрический ток, в нём участвует бессчётное множество свободных электронов.



ВК-88. *В двигателях, питаемых постоянным током (ток одного направления, например, от батареи), вращение можно получить, если в простейшем роторе — в рамке — каждые пол-оборота менять направление тока. При этом силы, выталкивающие провода рамки, согласно правилу левой руки, всегда будут вращать её в одном и том же направлении. Менять направление тока в рамке может переключатель из двух связанных с началом и концом рамки полуколец и двух скользящих по ним контактов, связанных с батареей.*


1
2
В каждом автомобиле есть батарея из соединенных последовательно 6 кислотных аккумуляторов. У каждого э.д.с примерно 2,1 вольта, общее напряжение 2,1×6=12,6 вольт.
3
Иногда вместо гальванического элемента АА используют аккумулятор, имеющий те же габариты, и примерно ту же э.д.с. и емкость.
190
247
175
Зарядное устройство
4
5
При последовательном соединении аккумуляторов напряжение возрастает, но допустимый общий ток такой же, как у одного из них. Этот ток становится больше при параллельном соединении, но э.д.с. при этом не растет.

Р-28. ОМОЛОЖЕНИЕ, ПРОЦЕСС ЭЛЕКТРОТЕХНИКОЙ ОСВОЕННЫЙ. Аккумулятор (от латинского «аккумуляре» — «собирать») это, по сути дела, тот же гальванический элемент, и главная его работа та же — превращать химическую энергию в электрическую. Для этого в аккумуляторе также имеются два электрода (две группы пластин), погружённых в жидкий электролит, их общая задача за счёт химических реакций создавать и поддерживать на одном из электродов избыток электронов (катод, электрод «—») и на другом — их недостаток, то есть в итоге избыток положительных зарядов (анод, электрод «+»). Главная особенность аккумуляторов в том, что для них выбраны и отработаны обратимые процессы — ту энергию, которая была затрачена на создание электрического тока, можно вернуть, причём вернуть так, чтобы восстановилось первоначальное состояние электродов и электролита. Аккумулятор вновь станет молодым и работоспособным.

Таким образом, у аккумулятора могут быть два режима: **1**. Передача электрической энергии во внешнюю цепь и, в частности, сопротивлению нагрузки, то есть, коротко говоря, разряд (разрядка) аккумулятора. **2.** Получение энергии (в виде тока противоположного направления по отношению к разрядному) для восстановления изменившихся при разряде аккумулятора электродов и электролита, называется зарядкой аккумулятора. Часто аккумулятор работает в так называемом буферном режиме (от английского

глагола «ту буфф» — «смягчать»), он всегда связан с зарядным устройством, получает от него зарядный ток при первой необходимости и, как правило, небольшими порциями. Но даже и в таком щадящем режиме постепенно разрушаются пластины аккумулятора, и через несколько лет его приходится менять. Аккумуляторы и гальванические элементы можно, как и другие источники тока, соединить в батарею, получив при этом более высокие некоторые их параметры (4, 5).

9. Электродвижущая сила *E* (э.д.с.) генератора тем больше, чем сильнее «минус» выталкивает электроны и чем сильнее «плюс» тянет их к себе. Чем больше E, тем большую работу может выполнить генератор, перемещая электроны от «минуса» к «плюсу».

10. Двигаясь в проводнике, электроны непрерывно наталкиваются на местные атомы (Т-8), встречают сопротивление проводника. Чем оно больше, тем труднее двигаться электронам, тем меньше ток.

11. В последовательной цепи ток поочерёдно проходит все препятствия, и общее сопротивление равно сумме всех сопротивлений.

12. На каждом участке последовательной цепи реально действует часть э.д.с. — это напряжение на участке. Чем больше сопротивление участка, тем автоматически больше напряжение (большая часть э.д.с.), которое ему достаётся, но во всех участках последовательной цепи ток одинаковый.

13. Увеличиваем сопротивление какого-либо участка последовательной цепи — и напряжение на нём растёт. Но сумма всех местных напряжений неизменна, это общая э.д.с. на выходе генератора.

14. Параллельно какому-нибудь сопротивлению подключаем второе, и общее сопротивление уменьшается. Если подключим маленькое сопротивление (по сравнению с основным) — общее уменьшится сильно, подключим большое — общее сопротивление уменьшится незначительно.

15. Одну и ту же мощность можно получить при большом напряжении и малом токе или при большом токе и малом напряжении. У автомобильной лампочки напряжение небольшое (12 В), а ток большой, у такой же по яркости лампочки для домашней электросети наоборот, напряжение немалое (220 В), а ток сравнительно небольшой.

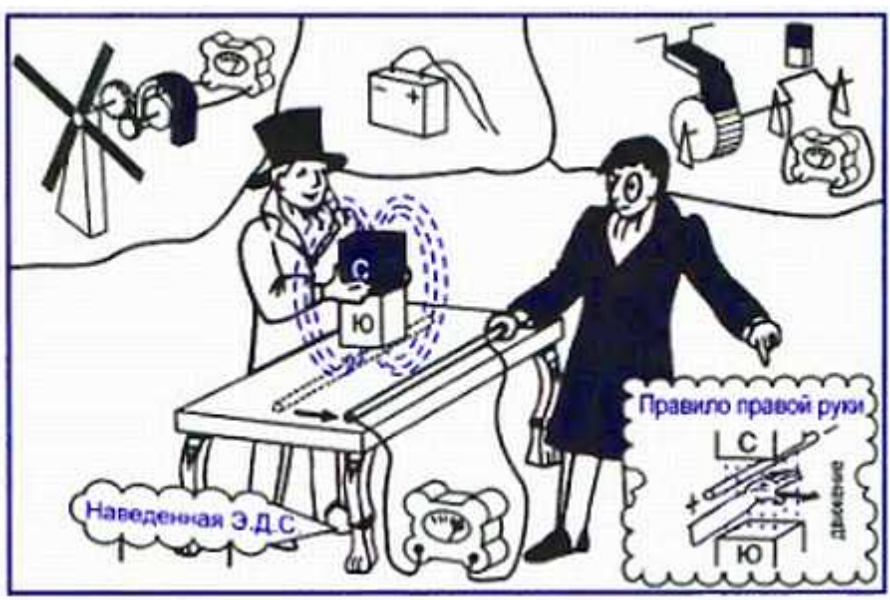
16. Если к двум лампочкам подводится одно и то же

напряжение, то мощность будет больше у той, у которой меньше сопротивление, — по ней идёт более сильный ток.

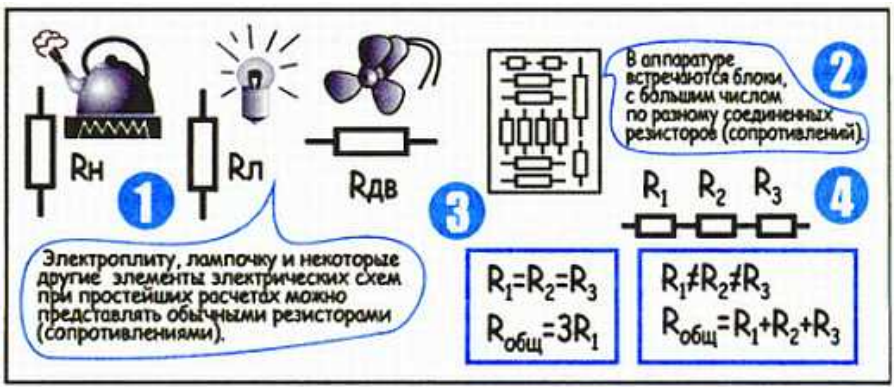
Не будем продолжать этот полезный список, его продолжит практика — освоение языка, как говорится, по ходу дела. Но несколько дополнений к «Списку образов» мы всё же сделаем. Они расскажут о том, что уже встречалось, но расскажут несколько иначе, применительно к иным схемным ситуациям. И это вполне нормально, в любом языке есть синонимы — разные слова, которые говорят о чём-то одном, но часто несколько по-разному.

Т-78. **Последовательная цепь — делитель напряжения, параллельная — делитель тока.** Любая пара соседних сопротивлений в последовательной цепи это, по сути дела, делитель напряжения. Он делит исходное, то есть подведённое к этой паре, напряжение в строго определённой пропорции — она повторяет соотношение самих сопротивлений. Подобрав элементы делителя, можно получить любое нужное напряжение, но, разумеется, оно всегда будет меньше, чем подводится к делителю. Чем меньше напряжение, которое нужно получить, тем меньше должно быть сопротивление, с которого это напряжение снимается.

Аналогично с помощью параллельно включённых сопротивлений можно в нужной пропорции разделить ток. Он разветвится обратно пропорционально сопротивлениям ветвей — чем меньше сопротивление ветви, тем большая часть общего тока в неё пойдёт.



ВК-89. *Единая природа электричества и магнетизма стала основой для производства электроэнергии с помощью машинных генераторов. Путь к ним открыла электромагнитная индукция — в проводнике при его движении в магнитном поле наводится э.д.с. Это открытие было сделано в августе 1832 года, через 12 лет после того, как было обнаружено магнитное поле тока. Направление наведённой (индуцированной) э.д.с., то есть «плюс» и «минус» на концах движущегося проводника, определяется по правилу правой руки.*



Р-29. В СХЕМАХ НЕКОТОРЫЕ АППАРАТЫ УДОБНО ПРЕДСТАВЛЯТЬ ОБЫЧНЫМИ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ. Электрический чайник, плита или лампочка потребляют из электрической цепи определённую мощность и превращают её в тепло. Эта мощность в конечном итоге определяется сопротивлением электронагревателя в чайнике или светоизлучателя лампочки. В нарисованных схемах эти и многие другие приборы, как правило, можно заменить обычными резисторами. Блоки с большим количеством резисторов часто встречаются в электронной аппаратуре, при работе с ними нередко приходится подсчитывать их общее сопротивление или часть его. При последовательном соединении резисторов это довольно просто (3,4). При параллельном их соединении задача несколько осложняется, но тоже остаётся вполне решаемой (Р-30).

Т-79. **Особые делители — шунт и добавочное сопротивление.** Часто в делителе напряжения одно из сопротивлений — это сама нагрузка. Необходимое напряжение на

нагрузке в этом случае можно установить, подобрав сопротивление остальной части делителя, обычно её называют «гасящее сопротивление», и это очень удачное название. Действительно, гасящее сопротивление как бы гасит излишек напряжения, берёт его на себя с таким расчётом, чтобы нагрузке досталось то, что ей требуется.

Аналогично можно пропустить через нагрузку необходимый ток, подключив параллельно ей сопротивление. Оно получило название «шунт» (в переводе с английского — «обходной путь»), а само подключение шунта называется шунтированием. Шунт включают в том случае, когда без него ток в нагрузке был бы слишком большим. Или, скажем иначе, шунтирование снижает ток через нагрузку, ответвляя в шунт часть общего тока. Чем меньше сопротивление шунта, тем сильнее шунтирование, тем меньшая часть общего тока достаётся нагрузке и тем большая его часть пойдёт через шунт. Слова «шунт», «шунтирование» можно встретить не только в электротехнике, в частности, хирурги производят шунтирование плохо пропускающих кровь участков кровеносного сосуда — параллельно им вшивают другие, исправные куски сосудов.

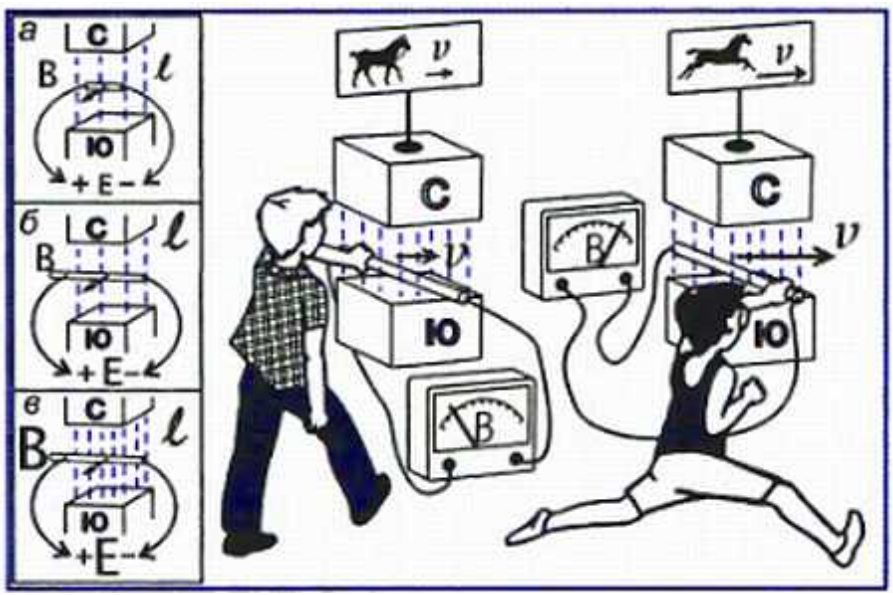
Т-80. **Чтобы увеличить нагрузку, нужно уменьшить сопротивление нагрузки**. Нагрузкой, если вы помните, мы назвали элемент цепи, который получает от генератора электрическую энергию и каким-то образом преобразует её с пользой для дела. В карманном фонарике нагрузкой служит лампочка, на её сопротивление расходуется энергия электрического тока, превращаясь в энергию света.

Может показаться, что выражение «увеличить нагрузку» означает «увеличить сопротивление нагрузки». Это, однако, ошибочное предположение, и ошибка происходит из того, что слово «нагрузка» имеет в данном случае два разных значения.

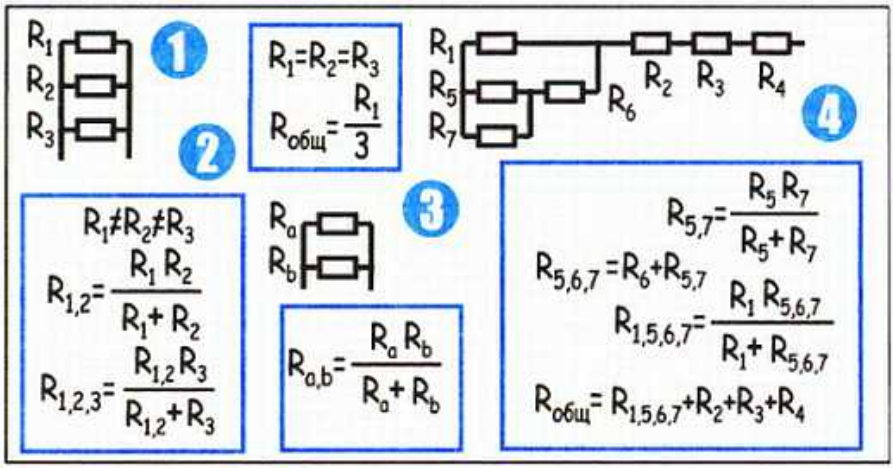
Одинаковые слова, но с разным значением есть в любом языке, они называются «омонимы». Мы уже говорили об омонимах, размышляя о разных значениях слов «сила», «ключ», «коса» (Т-46). В языке электротехники омонимами оказались два значения слова «нагрузка». Во-первых, нагрузка — это главный потребитель энергии электрогенератора, например лампочка, утюг, пылесос или мощный мотор электропоезда. Во-вторых, под словом «нагрузка» подразумевают ещё и саму электрическую мощность, которую генератор отдаёт своему потребителю. Когда говорят: «У городской электростанции вечером самая большая нагрузка», то имеют в виду, что наибольшую мощность станционные генераторы должны отдавать вечером. Если нужно увеличить сопротивление нагрузки, то, чтобы избежать путаницы,

так и говорят: увеличить сопротивление нагрузки. А выражение «увеличить нагрузку генератора» означает «увеличить мощность, отбираемую у генератора».

Как увеличить эту мощность, если э.д.с. генератора изменить нельзя? Для увеличения мощности остаётся только один путь: нужно увеличить ток в цепи (Т-76). А как можно увеличить ток в цепи? Для этого, как учит закон Ома, нужно уменьшить сопротивление цепи, основа которого — сопротивление нагрузки. Вот и получается, чтобы увеличить нагрузку на генератор, увеличить потребляемую от него мощность, нужно уменьшить сопротивление нагрузки. Именно так и поступают специалисты, когда они говорят: «Нагрузка увеличилась», то это означает, что сопротивление нагрузки стало меньше и потребляемая мощность возросла.



ВК-90. *При электромагнитной индукции наведённая э.д.с.* ***E*** *зависит от трёх величин: от индукции B магнитного поля, от скорости v движения проводника и от его длины* ***l****. Чем больше индукция* ***B****, тем сильнее влияет магнитное поле на происходящие события, тем больше наведённая э.д.с. Она растёт и с ростом длины проводника* ***l****, при этом больше электронов взаимодействует с полем. И, наконец, э.д.с. растёт с увеличением скорости v проводника — именно его движение создаёт электромагнитную индукцию.*



Р-30. ОБЩЕЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ РЕЗИСТОРОВ ЧАСТО ОПРЕДЕЛЯЮТ В НЕСКОЛЬКО ЭТАПОВ. Такое бывает при параллельном соединении разных резисторов, когда их три и более. В этом случае, оказывается, проще двигаться к неизвестному пока общему сопротивлению последовательно, пользуясь очень простой формулой для подсчёта общего сопротивления двух разных резисторов, соединённых параллельно (3). Фольклор радистов и электриков называет эту формулу «произведение на сумму», так как два главных действующих лица в ней — это произведение двух параллельно включённых сопротивлений (числитель) и их сумма (знаменатель). Подсчитав по этой формуле общее сопротивление пары резисторов, в дальнейшем рассматривают их как одно уже известное сопротивление и подсчитывают общее сопротивление трёх сопротивлений, затем четырёх, пяти и так до полного расчёта общего сопротивления всей цепи. Чтобы этот простой процесс не показался сложным, на рисунке приведены примеры использования формулы «произведение на сумму» (1,4).

***Т-81*. Напряжение на выходе генератора всегда меньше, чем э.д.с., и оно падает с увеличением нагрузки.** Настал момент вспомнить о невидимом, но непременном участке электрической цепи — о внутреннем сопротивлении генератора $R_{внг}$ (Р-33). В химическом генераторе оно в основном складывается из сопротивления самих электродов и

сопротивления электролита, в машинном генераторе это сопротивление его рабочих обмоток. По внутреннему сопротивлению генератора проходит весь ток, который идёт во внешней цепи, независимо от того, как выглядит эта цепь и насколько она сложна. Иными словами, внутреннее сопротивление генератора $R_{внг}$ включено последовательно с внешней цепью.

Мы знаем, что э.д.с. генератора делится между всеми участками последовательной цепи, и при этом внутреннему сопротивлению $R_{вн}$ тоже что-то достаётся. Из этого можно сделать два вывода.

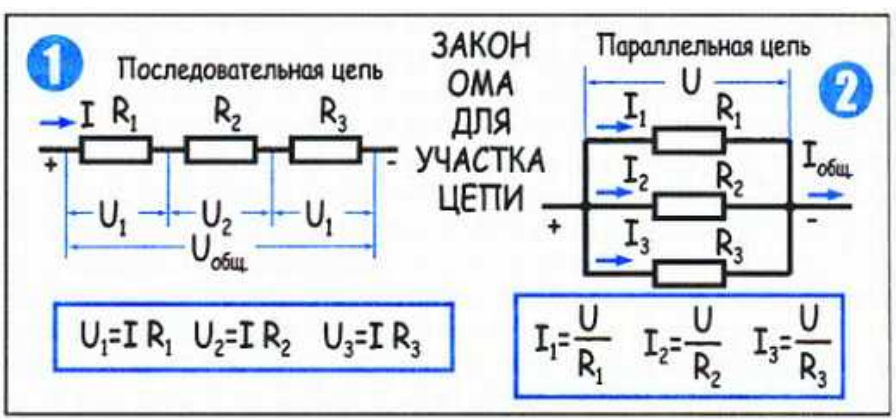
Первый вывод. Чем больше нагрузка, то есть чем больше потребляемый от генератора ток, тем меньше напряжение $U_г$ на выходе генератора, или, как иногда говорят, на его зажимах. Потому что с увеличением тока растёт напряжение, которое остаётся на $R_{внг}$ и это напряжение вычитается из э.д.с. Можно и иначе взглянуть на происходящее: внутреннее сопротивление и внешняя цепь образуют своего рода делитель напряжения; чтобы увеличить потребляемый ток, нужно уменьшить сопротивление внешней цепи; в результате э.д.с. перераспределяется и внешней цепи достаётся меньше, чем до того.

Второй вывод. В химических генераторах внутреннее сопротивление со временем может увеличиваться, главным образом из-за изменений в химическом составе электродов и электролита. При этом увеличивается та часть э.д.с., которая остаётся внутри генератора, и уменьшается напряжение $U_г$ на его выходе.

То, о чём сказано в этих двух выводах, каждый, скорее всего, знает из собственного опыта. Так, по мере того как расходует свою энергию батарейка, лампочка карманного фонаря светится всё более тускло — это растёт внутреннее сопротивление батарейки. Автомобилисты знают, что если заводить автомобиль при включённом свете, то в момент включения стартёра свет станет заметно слабее — это появился дополнительный большой ток через стартер, увеличился общий ток, потребляемый от аккумулятора, стало больше напряжение $U_{внг}$ которое теряется на его внутреннем сопротивлении $R_{внг}$ и поэтому уменьшилось напряжение $U_г$ на его выходе.

Подавляющее большинство электрических систем проектируются с таким расчётом, чтобы внутреннее сопротивление $R_{внг}$ генератора было очень небольшим, и поэтому оно начинает чувствоваться лишь при очень большой нагрузке, когда на $R_{внг}$ теряется заметное напряжение.

ВК-91. *К сожалению, мы часто забываем, что на какие-либо процессы оказывает главное влияние не абсолютный уровень какой-то величины, а скорость её изменения. Возьмём, к примеру, два бассейна для плавания, один наполнен водой наполовину, а во втором воды чуть-чуть, её слой два-три сантиметра, не больше. Но в первом бассейне краны почти закрыты, а во втором открыты полностью. И через несколько минут второй бассейн уже почти полный, а первый так и остался в районе своей половины.*



Р-31. ЗАКОН ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ. Недавно, разбирая на Р-26 закон Ома, мы отметили, что он справедлив для большой и сложной цепи, где **R** — это измеренное или подсчитанное её общее сопротивление.

Но закон Ома справедлив и для малой части этой большой цепи, он всегда, даже на самом небольшом её участке, отмечает строго определённое соотношение между напряжением **U**, током **I** и сопротивлением **R**. Уже пора отметить, что словом «напряжение» мы называем ту часть э.д.с., которая досталась какому-либо участку сложной цепи. Для этого участка действующее на нём напряжение **U** имеет тот же смысл, то же значение, что и вся электродвижущая сила (э.д.с.) **E** генератора для всей подключённой к нему цепи. И поэтому напряжение, так же как э. д.с., измеряется в вольтах.

T-82. **Электротехника — наука о контактах**. Это, конечно, шутка, но со значением. Нередко нарушение контакта в каком-нибудь участке цепи приводит к неисправностям и нестабильностям, которые очень трудно обнаружить. Вместе с тем загадочные нарушения контактов обычно легко объяснимы.

Всегда есть некоторое сопротивление между соприкасающимися металлическими поверхностями, как, например, между гальваническим элементом и пружинящими контактами в карманном фонарике. Это небольшое сопротивление часто связано с загрязнением или окислением металлической поверхности, а также с ослаблением чисто механического сжатия контактирующих деталей. Контактное сопротивление, подобно внутреннему сопротивлению генератора, включено в электрическую цепь последовательно, и на нём теряется какая-то часть напряжения. При хорошем контакте она очень мала и ею можно пренебречь, но если контакт плохой, если его поверхности окислились или плохо сжаты, то на переходном сопротивлении контакта может остаться заметная или даже основная часть э.д.с., при этом остальным элементам цепи мало что достанется.

T-83. **Вольтметр, амперметр и омметр — приборы для измерения э. д.с. (напряжения), тока и сопротивления.** Многие разделы этой главы посвящены языку электрических схем, пользуясь которыми, мы думаем о них, изучаем их и в них разбираемся. При этом основные объекты наших размышлений — соединение элементов цепи, их раздельное и общее сопротивление, токи в них, напряжение на участках цепи. Многие из этих параметров можно измерить, ускорив тем самым исследование электрической цепи или проверяя свои выводы.

Для измерений в электрических цепях чаще всего используются три прибора — вольтметр для измерения э.д.с. и

напряжения, амперметр для измерения силы тока и омметр для того, чтобы измерять сопротивление. Приборы эти бывают нескольких разных типов, и позже мы сможем познакомиться с их устройством. Пока же представим себе каждый такой прибор как небольшую чёрную коробочку со шкалой и стрелкой, по отклонению стрелки от нулевой отметки как раз и определяют измеряемую величину. В последнее время, правда, появляется все больше приборов с цифровым отсчётом в них, результат измерений появляется на небольшом экране сразу в виде цифр.

Несколько отложив знакомство с вольтметром, будем условно считать, что он как-то измеряет разницу между количеством избыточных зарядов в двух точках цепи, определяет, где каких зарядов больше и насколько. Вольтметр как бы вычисляет, какую работу выполнит каждый кулон электричества, пройдя по цепи между выбранными точками, и выдаёт результат в вольтах.

ВК-92. *Этот рисунок возвращает нас в мир электричества и ещё раз напоминает, что в ряде процессов, в частности, при наведении в катушке э.д.с.* ***E*** *за счёт электромагнитной индукции, важна не абсолютная величина (как, например, в законе Ома — чем больше напряжение, тем больше ток), а скорость её изменения. Об этом говорят два примера на рисунке — в одном случае (слева) магнитное поле перемещается сравнительно медленно относительно катушки, а во втором случае (справа) очень быстро.*

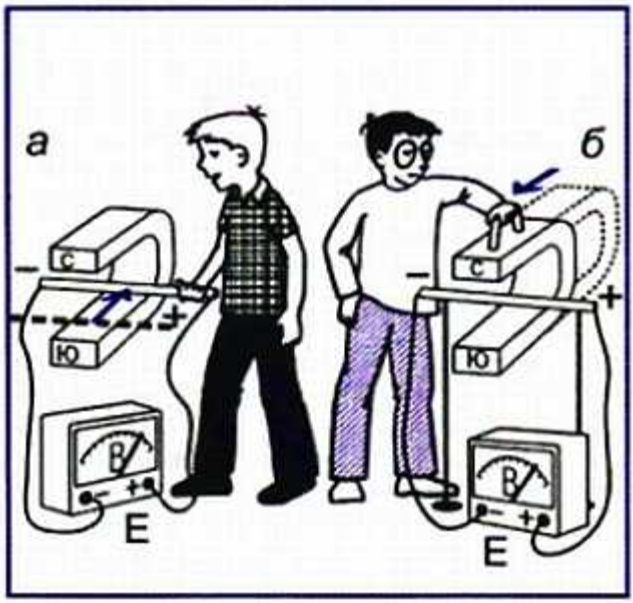
Подключается вольтметр к тем двум точкам, напряжение

между которыми нужно измерить, то есть подключается параллельно участку, на котором измеряют напряжение. При этом собственное сопротивление вольтметра должно быть во много раз больше, чем сопротивление участка, к которому он подключён. Потому что подключение вольтметра к участку цепи — это фактически его шунтирование, и вольтметр с недостаточно большим сопротивлением может заметно уменьшить общее сопротивление участка. В итоге вольтметр покажет меньшее напряжение, чем было до его подключения.

Амперметр — это как бы счётчик движущихся зарядов со встроенным секундомером. Прибор включается последовательно в цепь, в которой нужно измерить ток, и, «подсчитав» (Т-8) количество зарядов, проходящих по цепи за одну секунду, показывает величину тока сразу в амперах. Собственное сопротивление амперметра должно быть во много раз меньше, чем общее сопротивление цепи, иначе он сам заметно изменит это сопротивление и покажет ток значительно меньший, чем был до включения прибора.

Омметр можно представить себе как комбинированный прибор, который одновременно измеряет напряжение и ток и сразу же по формуле закона Ома вычисляет сопротивление (Р-26). Возможен и более простой вариант: элемент цепи, сопротивление которого нужно измерить, подключается к генератору, э.д.с. которого известна, и тогда омметр определяет сопротивление только по величине тока.

Даже не имея реальных измерительных приборов, можно мысленно или на рисунке, на принципиальной схеме подключать к изучаемой цепи эти подразумеваемые приборы, их предполагаемые показания могут стать важными образами в языке электрических схем.



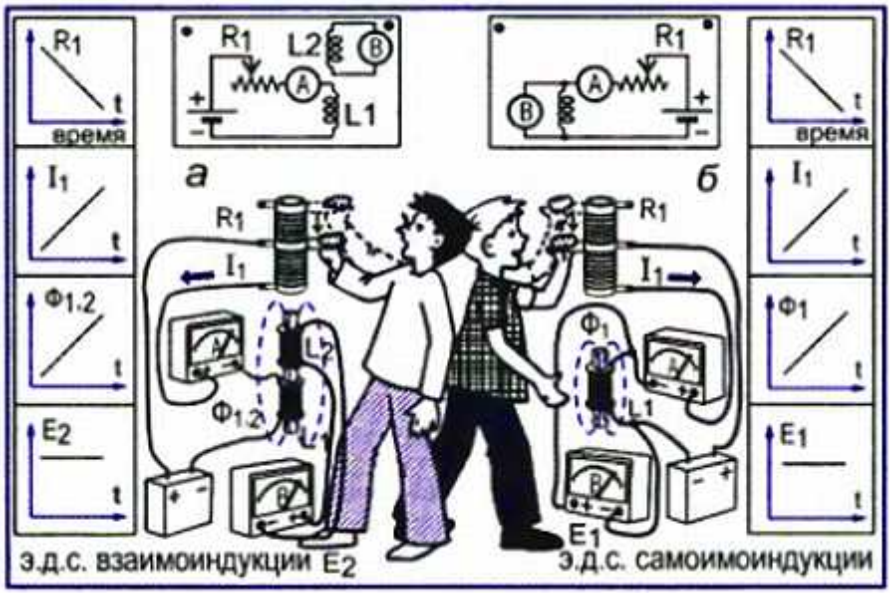
ВК-93. *Предыдущий рисунок предоставил вам возможность, до которой вы уже, видимо, сами додумались. Мы начали с одного вида электромагнитной индукции из нескольких возможных — э.д.с. наводилась в проводнике, который мы двигали в магнитном поле (ВК-90). То же самое произойдёт в проводнике, если двигать не его, а перемещать сам магнит. Именно это и показано на предыдущем рисунке, именно это вы видите и сейчас (справа). Несмотря на кажущееся неудобство, этот вариант широко применяется.*

Т-84. **Сложная электрическая цепь — система из последовательно и параллельно соединённых элементов**. Уже попытка нарисовать реальную схему карманного фонаря приводит к электрической цепи из семи последовательно соединённых элементов. На практике же приходится иметь дело с цепями более сложными и значительно более сложными. Что такое, например, телевизор? Это тоже электрическая цепь, но состоящая из многих тысяч элементов, сложным образом соединённых между собой. А вычислительная машина? Это цепь из многих миллионов элементов и даже из миллиардов. Огромные, протянувшиеся на многие километры электрические цепи обнаружатся в московском, лондонском или парижском метро, в каждую такую цепь входят мощнейшие генераторы, много тысяч ламп освещения, сотни двигателей в поездах, сложная электрическая автоматика. Даже простенький карманный приёмник или простейший настольный телефонный

аппарат — это электрические цепи, в которых сложным образом соединены десятки деталей. Рассматривать сложные и очень сложные электрические цепи сразу целиком, к счастью, почти никогда не приходится. В большой, сложной машине всегда можно выделить самостоятельные узлы и агрегаты, в автомобиле, например, это двигатель, коробка перемены передач, передний мост, задний мост, рулевое управление, тормозная система. В рядовом электрическом приборе тоже можно выделить свои узлы и блоки, в каждом несколько десятков или даже всего несколько элементов. С такими количествами справиться уже не очень сложно.

Т-85. **Меняя какой-либо элемент сложной схемы, нужно понимать, как изменятся токи и напряжения на разных её участках**. Обдумывая очередной ход в шахматной партии, приходится учитывать множество возможных его последствий. Точно так же, изменяя сопротивление какого-либо участка сложной электрической цепи, приходится думать о том, что произойдёт на всех других участках. Потому что элементы сложной цепи взаимосвязаны, они разными путями и в разной степени влияют на условия жизни своих близких и далёких соседей (Т-8). Научиться понимать электрические схемы, научиться, как принято говорить, свободно их читать — это, прежде всего, значит научиться быстро оценивать, как именно связаны между собой элементы сложной цепи, как они влияют на токи, напряжения, потребляемые мощности, одним словом, на режим других элементов.

По этому поводу уже было дано немало рекомендаций, и настало время практики. Начать можно с какой-нибудь несложной схемы, в которой, меняя тот или иной элемент, легко следить за изменениями токов и напряжений. Попробуйте всмотреться в цифры и объяснить, почему они именно такие — это будет полезная практическая работа по использованию языка электрических схем, его грамматических правил и образов. К числу последних хочется в конце главы добавить ещё один, он не имеет прямого отношения к электричеству, но пользу может принести бесспорно.

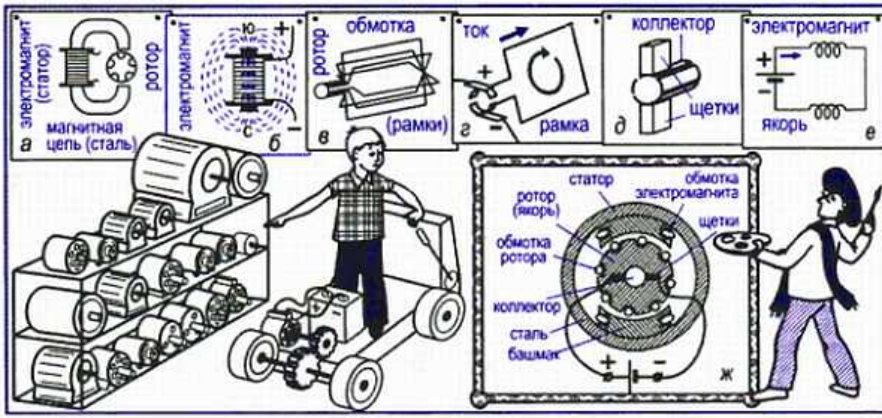


ВК-94. *Вот что такое электромагнитная индукция: если менять магнитное поле, в котором находится проводник или катушка, то в них наведётся э.д.с. Менять поле можно по-разному Можно двигать в нём проводник или двигать само поле. Можно поместить проводник или катушку* (L_1) *рядом с электромагнитом* (L_2) *и, меняя в нём ток, менять магнитное поле — это взаимоиндукция. Можно менять ток в самой катушке* (L_1)*, и изменение собственного магнитного поля наведёт в ней э.д.с. — это самоиндукция.*

Т-86. **Рассматривая сложную электрическую схему, очень важно не терять уверенности в том, что во всём в итоге можно разобраться**. Образ, который сейчас будет представлен, как уже говорилось, к электричеству отношения не имеет. Это известный литературный образ — лесковский Левша. Глубоко понимая своё дело, освоив его до самого совершенного совершенства, мастер не считал это чем-то выдающимся: мы знаем хорошо своё ремесло, говорил он, умеем делать без мелкоскопа самую мелкую работу, потому что «у нас так глаз пристрелямши».

Спокойное отношение к делу, которое делаешь, уверенность в том, что сможешь сделать его наилучшим образом, уверенность в себе — всё это особо важно, когда имеешь дело с электрическими цепями. Потому что здесь ты попадаешь в невидимый электрический мир, и что-то сделать в нём можно только в том случае, если твёрдо знаешь, что делать. И если веришь, что это не

цирк, чудес здесь не бывает, и в любой электрической сложности в итоге можно разобраться.



ВК-95. *В электродвигателях вместо постоянных магнитов обычно используют электромагниты, их многовитковые обмотки помещают в неподвижной части двигателя — в статоре. Для повышения мощности на валу увеличивают число проводов рамки, превратив её в многовитковую обмотку ротора — вращающейся части двигателя. Чтобы снизить сопротивление магнитной цепи и повысить магнитную индукцию, ротор и статор изготовлены из стали, а также до предела уменьшен воздушный зазор между ними.*

Т-87. **Главная действующая сила недолго будет оставаться в тени**. Мы немало потрудились, чтобы включить в арсенал своих знаний непростое представление о разного рода полях, главным образом об электрическом поле. Но почему-то представление это, скажем прямо, нам пока не очень понадобилось — если не вникать в подробности, то можно, оказывается, описать многие процессы в электрических цепях, не вспоминая об электрическом поле. Представление о нём в основном понадобится в последующих разделах, например, когда речь пойдёт о накоплении энергии в конденсаторе или о скорости, с которой электричество передаётся на большие расстояния.

Однако непривычная и, возможно, поэтому несправедливо замалчиваемая важнейшая сущность нашего мира — поле — далее уже не будет оставаться в тени. Нам предстоит незамедлительно обратиться к ещё одной разновидности физических полей — к магнитному полю. Без него просто невозможно сделать следующий шаг — познакомиться с магнитами, с магнитными явлениями и с великим

электромагнитным союзом, неслыханно обогатившим человечество.

Глава 7
Рождённый движением

Электрические силы и магнитные — два проявления единой физической сущности по имени «электромагнетизм». Иногда обе эти силы действуют совместно, а иногда раздельно, как бы совершенно независимо. В электрических аппаратах и системах мы в чистом виде встречаемся с электричеством значительно чаще, чем с магнетизмом, очевидно поэтому в учебных книгах основное внимание уделяется электрическим цепям и процессам. Вместе с тем магнитные явления играют в электрическом мире чрезвычайно важную роль. Достаточно вспомнить, что все электродвигатели работают благодаря взаимодействию электрических и магнитных сил, так же, впрочем, как и мощные генераторы на всех электростанциях. Поэтому, отдавая должное чисто электрическим цепям, ни в коем случае нельзя обидеть невниманием процессы магнитные. Пусть не очень вникая в количественную сторону дела, нужно понимать физическую сущность магнитных и особенно электромагнитных явлений, без которых электричество никак не достигло бы нынешних своих высот.

Т-88. **С магнитными силами, так же как с гравитационными и электрическими, проще всего познакомиться в простейших опытах.** Падающее на землю яблоко демонстрирует действие гравитационных сил, натёртая тряпкой пластмассовая гребенка притягивает лёгкие клочки бумаги и знакомит нас с электрическими силами. А теперь ещё одно знакомство — небольшой железный брусок, который мы называем магнитом, притягивает к себе железную булавку, и та, преодолевая силу тяжести, подскакивает вверх, как бы прилипает к бруску-магниту. Оговорка «железный брусок, который мы называем магнитом» нужна потому, что другие железные предметы булавку не притягивают, если, правда, она до этого не участвовала в опытах с магнитом. Кусок железа, не имеющий магнитных свойств, легко намагнитить (даже прикосновением намагниченной булавки), и тогда его тоже можно будет называть магнитом.

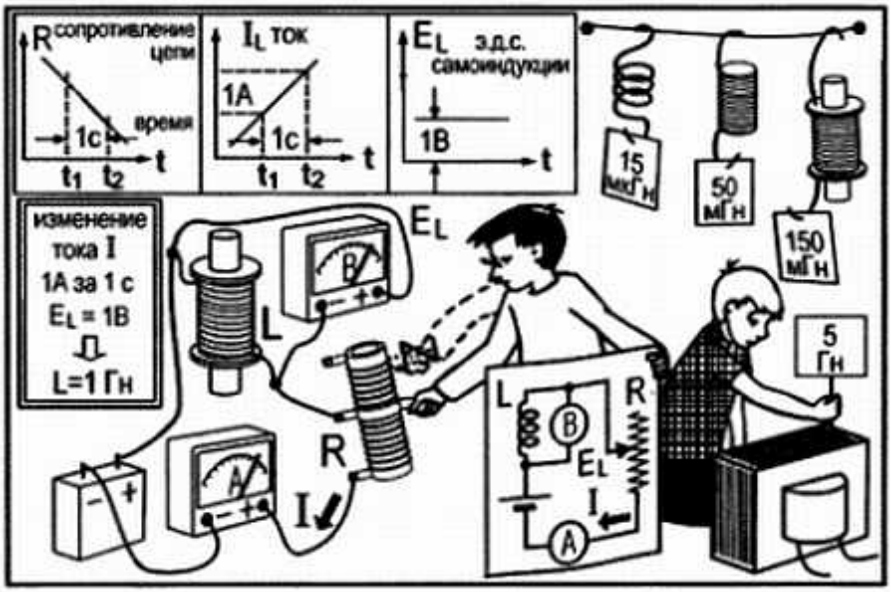
Итак, простейший опыт демонстрирует некую новую для нашего рассказа силу, которая в этом опыте оказалась сильнее

гравитационного притяжения Земли. Нетрудно убедиться, что это не электрическая сила из предыдущих наших опытов — поднесите к железному бруску (который мы называем магнитом) мелкие клочки бумаги, и они даже с места не сдвинутся. Новую особую силу, которая тянула вверх булавки, называют магнитной силой, а всё, что связано с её действием, — магнетизмом. Действует магнитная сила так же, как электрическая и гравитационная, определённым образом меняя состояние пространства — создавая в нём магнитное поле. Именно с помощью своего магнитного поля магнит воздействовал на булавку, заставив её двигаться вверх.

Магнетизм, так же как и электричество, был замечен человеком как минимум несколько тысячелетий назад. Разумеется, этот новый вид притягивающих сил, так же как и электричество, в те времена нельзя было объяснить. Их можно было только назвать, то есть, образно говоря, к куску железа с вновь открытыми свойствами прикрепить табличку «магнит». Загадочная способность притягивать мелкие железные предметы была обнаружена у железной руды из месторождений вблизи города Магнезия, одного из древних городов Малой Азии (нынешняя территория Турции). Вероятно, от этой Магнезии и пошло слово «магнит».

Примечательно, что вещество с магнитными свойствами нашли в готовом виде, а вот вещества с готовым, природным электрическим зарядом в природе не встречаются — чтобы у янтарной или стеклянной палочки появились электрические свойства, чтобы у них появился электрический заряд, палочки приходится натирать (Р-1). Мы знаем, что есть частицы вещества с самой маленькой порцией электрического заряда — это электрон с самым маленьким отрицательным зарядом и протон с положительным. А как же с магнитными свойствами? Какие микроскопические частицы, собравшись в железном бруске, создают вполне ощутимую магнитную силу?

Мы очень скоро ответим на эти вопросы, но прежде для порядка ещё несколько опытов из школьного репертуара.



ВК-96. *Поведение катушки в электрических цепях зависит от её способности создавать магнитное поле. Эта способность в свою очередь в основном определяется числом витков катушки, веществом, через которое замыкается поле, и называется индуктивностью катушки (**L**), или коэффициентом самоиндукции. Единица индуктивности — 1 генри (1 Гн), катушка имеет такую индуктивность, если при изменении тока в ней на 1 ампер за 1 секунду в катушке наводится электродвижущая сила самоиндукции в 1 вольт.*

Т-89. **Северный и южный полюсы магнита — два участка с особо сильно выраженными магнитными свойствами, но свойствами разного сорта**. Кусок железа с магнитными свойствами называют постоянным магнитом, в школьных опытах чаще всего используют специально изготовленные стержневые или подковообразные постоянные магниты. Если подносить булавку к разным участкам стержневого магнита, то окажется, что он притягивает эту булавку с разной силой. Сильней все го её притягивают концы магнитного стержня, по мере приближения к его центральной части магнитная сила ослабевает и, наконец, в самом центре магнитная сила вообще не чувствуется. Концевые участки магнита, обладающие особо сильными магнитными свойствами, называют его полюсами, в переводе с латыни слово «полюс» означает «предел, крайняя точка».

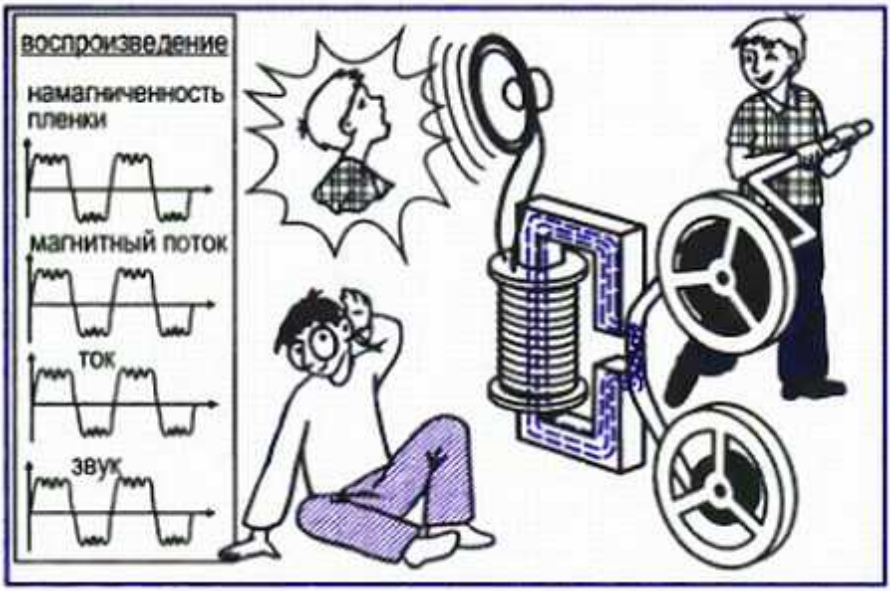
Проделав простейший опыт с двумя магнитами, легко убедиться, что у каждого из них полюсы (часто говорят полюса, с

ударением на последнем слоге) имеют магнитные свойства двух разных сортов. Двум разным полюсам магнита дали названия северный и южный и тут же отметили очевидный факт: если сближать два магнита, то обнаружится, что их разноимённые магнитные полюсы (северный и южный) взаимно притягиваются, а одноимённые (северный и северный или южный и южный) отталкиваются

Здесь уместно отметить, что на самих магнитах, а также на рисунках северный магнитный полюс сокращённо обозначают буквой «С», а южный — буквой «Ю». Встречаются также обозначения N, скорее всего от немецкого слова Nord, голландского Nord или английского North — «север», и S от немецкого Sud или английского South «саус» — «юг».

Притяжение и отталкивание магнитных полюсов напоминает взаимодействие двух видов электрического заряда — положительного и отрицательного, но полного сходства здесь нет. Так, в частности, нельзя получить отдельно чисто северный или чисто южный магнит, как мы получали отдельно электрический «плюс» и «минус», накопив в каком-то предмете положительные или отрицательные заряды. Если вы захотите получить отдельно северный и южный магнитные полюсы и для этого распилите магнит посередине, то получите два новых магнита, и у каждого будет свои северный и южный полюсы.

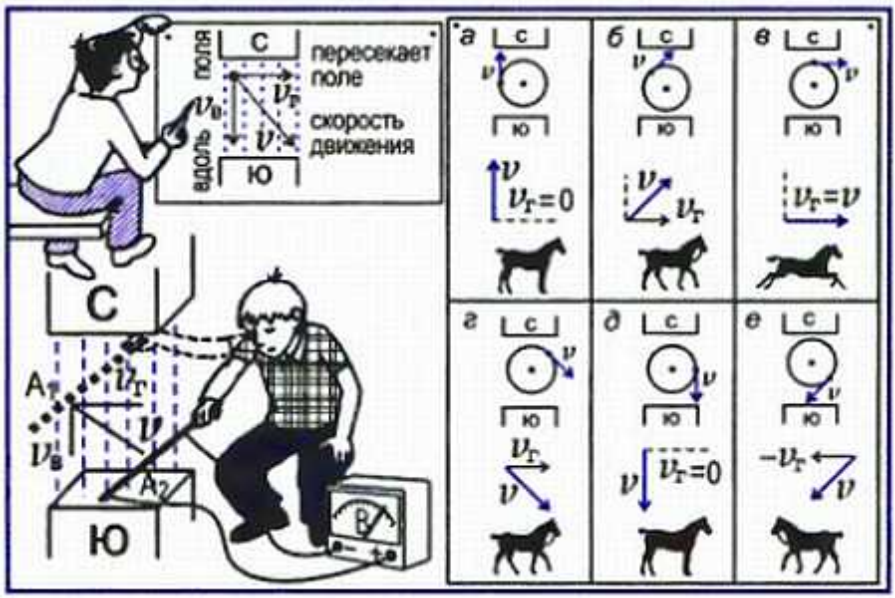
Чтобы пояснить, почему это происходит, вернёмся к опытам с наэлектризованными палочками и попробуем ответить на вопрос, к которому раньше умышленно не привлекалось внимание читателя.



ВК-97. *Познакомившись с электромагнитной индукцией, нетрудно понять, как из магнитной записи получают звук. Магнитная лента с записью (ВК-87) прилегает к воздушному зазору воспроизводящей головки (обычно для записи и воспроизведения используют одну переключаемую головку). Плёнка движется, и её намагниченность меняет магнитное поле сердечника (головки) и наводит в катушке меняющийся ток, такой же, какой участвовал в записи. Именно его громкоговоритель превращает в звук.*

Т-90. **Поляризация — физическое явление, которое объясняет некоторые загадочные электрические и магнитные процессы**. Начиная знакомство с электричеством и повторяя опыты древних греков, мы наблюдали, как мелкие клочки бумаги притягивались к натёртой пластмассовой или стеклянной палочке. У стеклянной палочки после натирания, как потом выяснилось, в некоторых молекулах или атомах образовалась нехватка электронов, то есть появился положительный электрический заряд, появился «плюс». Такая палочка с избыточным положительным зарядом притягивает предметы с отрицательным зарядом, с «минусом». Но почему она притягивает мелкие кусочки бумаги? Откуда у них взялся этот «минус»? Ведь клочки бумаги никто не натирал, в них положительных зарядов столько же, сколько отрицательных, то есть кусочки бумаги электрически нейтральны, без какого-либо избыточного электрического заряда. Так почему же, не имея никакого

электрического заряда, они притягиваются к электрическому «плюсу»?



ВК-98. *Настал момент сказать нечто очень важное. Когда упоминалась скорость проводника и вспоминалось, что и как от неё зависит, надо бы заметить, что речь идёт о движении поперёк магнитного поля. Если обмотка ротора вращается (как провода рамки), то эта скорость максимальна лишь в районе полюсов магнита, при горизонтальном движении. Во всех остальных случаях нужно найти её составляющую, пересекающую в данный момент магнитное поле. Она, конечно, всегда будет меньше наибольшей скорости.*

Р-32. КОМУ ТРУДНЕЕ, ТОТ ПОЛУЧАЕТ БОЛЬШЕ. Мы за короткое время обросли простыми объяснениями,

настолько очевидными, что их легко усваивает даже тот, кто делает первые шаги в знакомстве с работающим электричеством. Возьмём, к примеру, цепь из четырёх последовательно соединённых сопротивлений 4, 20, 8 и 8 Ом (1), ясно, что ток во всех участках этой цепи должен быть одинаковым. Представьте себе, что ток в первом сопротивлении больше, чем во втором (не будем создавать путаницу — считаем, что ток идет от «плюса» к «минусу»). В этом случае на границе будет непрерывно накапливаться какое-то количество лишних зарядов — в резистор сопротивлением 20 Ом им пути нет, там ток меньше. А если в первом сопротивлении ток будет меньше, чем во втором, то в переходе между ними придётся как-то добывать заряды, чтобы добавить их к тому, что движется в первом резисторе. Оба эти варианта совершенно невозможны, и нужно согласиться с тем, что ток во всех участках последовательной цепи одинаковый. Ну а если сопротивления разные, если какому-нибудь из них нужно больше энергии, то ему достанется большая часть э.д.с., и напряжение на нём будет больше. В полном соответствии с законом Ома достанется больше напряжения. В электрической цепи автоматически установится режим, учитывающий разные потребности в энергии на преодоление разных сопротивлений. Об этом же напоминает вспомогательный рисунок (2), где спуск с горки с постоянной скоростью (аналог одинакового на всех участках тока) возможен потому, что участки с разным покрытием по-разному наклонены (аналог смены напряжений в зависимости от сопротивления участка электрической цепи).

Всё, оказывается, очень просто. Электрическое поле натёртой палочки воздействует на атомы, которые входят в состав бумаги, и несколько деформирует эти атомы. Их электроны, не уходя со своих орбит, тянутся к «плюсу» натёртой палочки (Т-8), и электронные орбиты становятся вытянутыми. Это нарушает своеобразную электрическую симметрию атомов, происходит их, как принято говорить, электрическая поляризация, то есть появление у атома электрических полюсов (Р-18). На том конце вытянутого атома, который ближе к натёртой стеклянной палочке, ближе к «плюсу», преобладает суммарный «минус» электронов, а с противоположной стороны в основном действует «плюс» ядра. Совершенно нейтральный по своему суммарному

заряду атом превращается в электрический диполь — в частицу с двумя электрическими полюсами, положительным и отрицательным. Внешнее электрическое поле создаёт в кусочке бумаги сразу миллиарды таких атомов-диполей, все вместе они превращают в диполь весь этот кусочек бумаги, и он своим «минусом» тянется к «плюсу», к натёртой палочке.

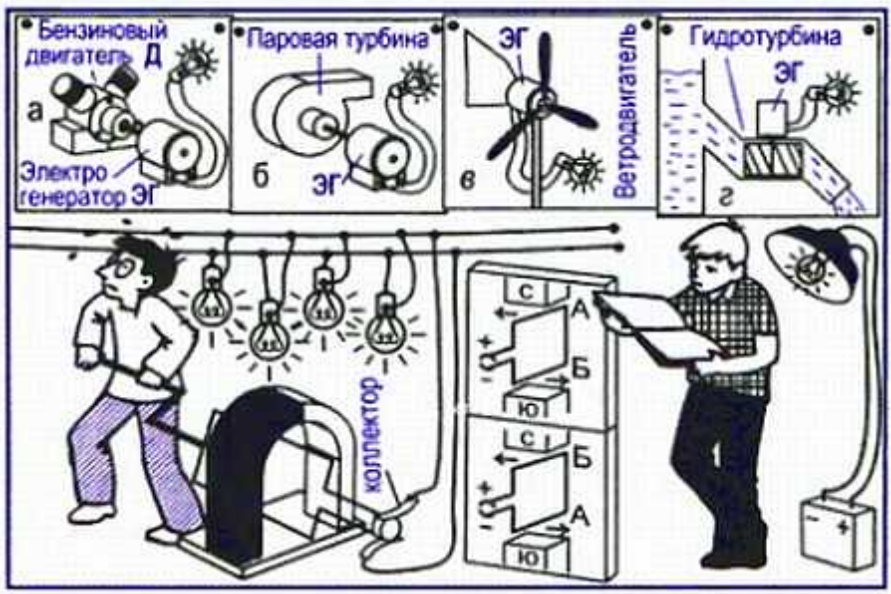
Пытаясь объяснить свойства магнита, часто представляют его в виде огромного количества маленьких магнитиков, которые находятся в куске железа. В обычном состоянии железа эти элементарные магнитики расположены беспорядочно, хаотично, и в среднем их магнитные силы полностью друг друга нейтрализуют. Если же поместить кусок железа во внешнее магнитное поле, например, поднести этот кусок железа к постоянному магниту, то элементарные магнитики повернутся в одну сторону и примерно в таком положении останутся навсегда. И так же как совместное действие множества поляризованных атомов превращало весь кусочек бумаги в электрический диполь, точно так же суммарное упорядоченное действие множества магнитиков превратит кусок железа в большой магнитный диполь: на одном его конце обнаружится концентрация северных магнитных свойств (северный полюс), а на другом конце — южных (южный полюс). То есть под действием внешнего магнитного поля кусок железа намагнитится — превратится в постоянный магнит.

Именно таким намагничиванием можно объяснить притягивание булавки к постоянному магниту. Сначала магнит намагничивает булавку, поляризует её — создаёт у неё северный и южный магнитные полюсы. Ну а после этого булавка, как любой другой магнит, своим северным полюсом притягивается к южному полюсу постоянного магнита, или наоборот — южным полюсом к северному. Модель постоянного магнита, состоящего из элементарных магнитиков, помогает понять, почему этот магнит невозможно разделить на отдельные северную и южную части. Кстати, при более подробном знакомстве (Т-91) мы увидим, что эта очень упрощённая модель не так уж далека от истины.

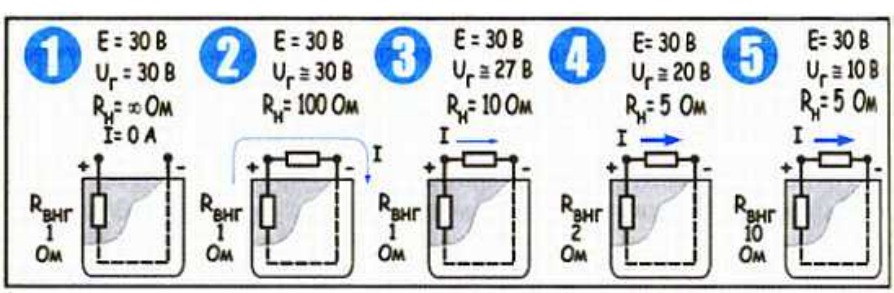
Несколько слов о двух особо популярных магнитах — это стрелка компаса и земной шар. Стрелка компаса — обычный постоянный магнит, или, лучше сказать, лёгкий магнитик, который может свободно поворачиваться в горизонтальной плоскости. И наша Земля тоже магнит, в районе Северного географического полюса находится южный магнитный полюс Земли, а её северный магнитный полюс находится в районе Южного географического полюса, в центре Антарктиды. Отсюда

ясно, почему северный магнитный полюс стрелки (он, как правило, окрашен в красный цвет) всегда смотрит на Север, где находится земной южный магнитный полюс, — разноимённые магнитные полюсы притягиваются.

Выполнив небольшую и несложную программу предварительной подготовки, мы можем вернуться к интригующему вопросу о природе магнетизма.



ВК-99. *Электрогенератор сам в принципе ничего не выдаёт, это просто необходимый нам преобразователь энергии. Чтобы генератор дал обещанную электрическую мощность, нужно, чтобы двигатель затратил чуть большую мощность, вращая ротор генератора. На большинстве электростанций это делают в основном мощные паровые турбины, которые в свою очередь используют энергию органического топлива — нефти, угля, газа. Примерно 15 % мощности приходится на гидростанции и столько же — на атомные.*



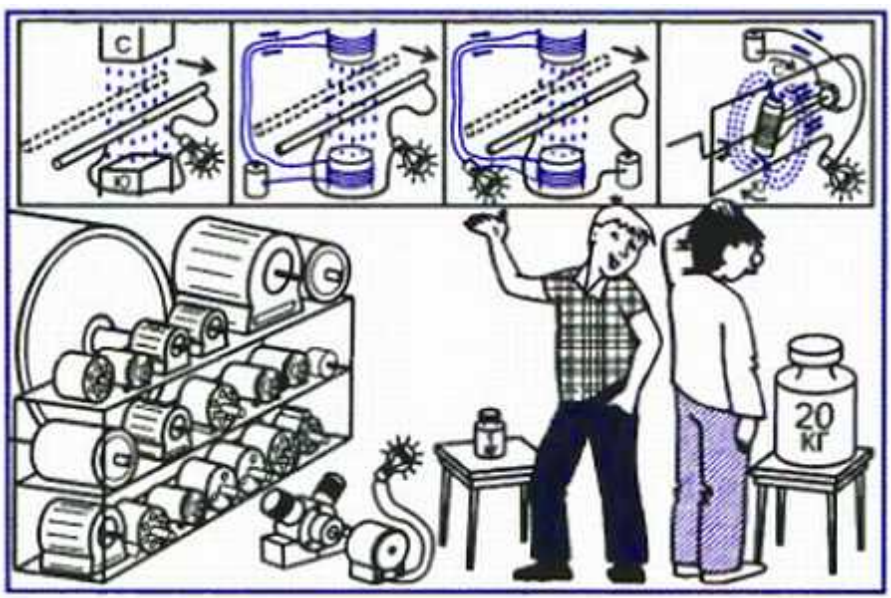
Р-33. ЭТОГО РЕЗИСТОРА ЛУЧШЕ БЫ НЕ БЫЛО ВООБЩЕ, НО ОН, К СОЖАЛЕНИЮ, ВСЕГДА ЕСТЬ. На рисунке вы видите пять одинаковых условных схем, помогающих объяснить важную особенность любого электрического генератора. На каждой схеме мы, прежде всего, видим два выходных провода, по которым генератор выдаёт во внешний мир свою продукцию — электродвижущую силу (э.д.с.) $\mathbf{U}_{\text{г}}$. К этим проводам подключается нагрузка $\mathbf{R}_{\text{н}}$. Как только нагрузка будет включена, во внешней цепи и в самом генераторе появится ток, он как раз и будет перебрасывать электрическую мощность оттуда, где она была создана, туда, где она будет выполнять какую-то работу. Этот ток пройдёт через внутреннее сопротивление генератора $\mathbf{R}_{\text{внг}}$, то есть пройдёт через резистор, который позволяет учесть потери энергии в самом генераторе.

В первом случае (1) генератор работает вхолостую, нагрузка не включена ($\mathbf{R}_{\text{н}} = \infty$), ток равен нулю, энергия в $\mathbf{R}_{\text{внг}}$ не теряется, на выходе генератора действует э.д.с. **E**. При сравнительно малой нагрузке (2), то есть при большом сопротивлении $\mathbf{R}_{\text{н}}$, (чем меньше сопротивление $\mathbf{R}_{\text{н}}$, тем большии ток от генератора потребляется, тем больше нагрузка), ток весьма невелик и на потери в $\mathbf{R}_{\text{внг}}$ можно не обращать внимания. Увеличим нагрузку в 10 раз (3), уменьшив для этого в 10 раз сопротивление нагрузки $\mathbf{R}_{\text{н}}$. Потери уже заметны, но напряжение генератора пока вполне приемлемое ($\mathbf{U}_{\text{г}} \sim= 27$ В) и в целом режим хороший, спокойный. Попытки форсировать его, получить от генератора значительно больший ток, быстро приводят к грустным результатам (4, 5) — из-за большого тока растут потери $\mathbf{R}_{\text{внг}}$ сильно падает рабочее напряжение $\mathbf{U}_{\text{г}}$ и генератор может быстро выйти из строя.

***Т-91*. Магнитное поле, оказывается, можно получить, размахивая натёртой пластмассовой палочкой.** Итак, откуда берётся магнетизм? Какая частица хранит мельчайшую порцию магнитных сил, подобно тому, как электрон или протон хранят мельчайшую порцию электрического заряда, вместе с массой полученную при рождении нашей Вселенной?

Ответить на заданный вопрос, оказывается, не так уж сложно, достаточно проделать несколько очень простых опытов. Для них,

правда, придётся добыть кое-какое оборудование: батарейку, две лампочки для карманного фонаря, компас и кусок провода. Соберите из этих элементов простейшую электрическую цепь для начала с одной лампочкой. Поднесите компас к проводу, по которому пойдёт ток, и на мгновение замкните цепь — стрелка компаса отклонится от своего привычного направления на Север и повернётся в сторону провода. Включите в цепь вторую лапочку последовательно с первой лампочкой и повторите опыт — ток в цепи уменьшится, и стрелка компаса отклонится слабее. А теперь повторите опыт, включив вторую лампочку параллельно первой, — сопротивление цепи уменьшится, ток возрастёт, и стрелка отклонится к проводу сильнее. Смените направление тока, поменяв полярность подключения батареи, и стрелка компаса отклонится в противоположную сторону. И последнее: разорвите цепь, прекратите ток в ней, и стрелка компаса тут же вернётся в исходное состояние, позабыв о проводнике, на который она только что равнялась, стрелка компаса будет, как всегда, показывать на Север.



ВК-100. *Нам пришлось немало узнать, знакомясь с устройством современных электрогенераторов. Большой путь прошли и сами они от замысловатых приборов, появившихся вскоре после открытия электромагнитной индукции, до серийных машин мощностью в сотни тысяч и даже в миллион киловатт. У них в роторе находится электромагнит (ВК-94), а катушки, в которых наводится э.д.с., неподвижны — через скользящие контакты проще*

передать в ротор не очень большую мощность для магнитной системы.

Р-34. ИЗМЕРЕНИЕ ДЛИНЫ (РАССТОЯНИЯ), МАССЫ, ВРЕМЕНИ И СИЛЫ. Рисунки от Р-34 до Р-38 помогут нам подвести некоторые итоги, прежде чем двинуться дальше в совершенно новые разделы книги. Первые три рисунка, так же как ранее Р-20, помогают вспомнить или наново определить для себя единицы, в которых мы количественно оцениваем участников событий в электрических цепях и сами эти события. Так, на этом рисунке Р-34 мы прежде всего (1) отмечаем единицу оценки длины 1 метр, сокращённо 1 м (принято говорить «единица измерения длины», «единица измерения массы», «единица измерения электрического тока» и т. д.). Меньше чем 150 лет назад, а именно в 1875 году, единица 1 м вместе с другими единицами была принята Конференцией 17 стран (Великобритания, Германия, Италия, Россия, США, Франция и другие), и этим как бы официально узаконили конец хаоса, когда чуть ли не каждый большой рынок по-своему отсчитывал длину или вес. История метра началась почти за 100 лет до его международного признания — в 1791 году французская Академия наук предложила парламенту страны сделать единицей длины часть проходящего через Париж меридиана. Несколько лет идея обсуждалась и утверждалась, группа учёных в полевых командах измерила реальную длину меридиана на участке Дюнкерк — Барселона (больше 1000 километров), и в 1799 году из платины был изготовлен эталон метра, равный по длине 1/40 000 000 (одной сорокамиллионной) части Парижского меридиана. Сейчас эталоны этого класса хранятся в музеях и практически не используются — наука научилась более точно измерять представленные ими величины. Так,

например, длину 1 метр можно представить как расстояние, которое свет в вакууме проходит за 1/299 792 458 секунды.

Но нас пока не интересуют с высочайшей точностью измеренные величины, нас интересуют величины наглядные и запоминающиеся, как, например, линейка, отображающая длину 1 метр, литровая банка воды, отображающая массу 1 килограмм, движение секундной стрелки часов, отображающее время 1 секунда, и полстакана молока или сока, отображающие силу притяжения к Земле (вес) 1 ньютон.

Из всех этих опытов можно сделать два неотвратимых вывода.

Вывод первый: магнетизм порождается электрическим током, то есть движением электрических зарядов, в наших опытах — движением электронов. Если ток (упорядоченное движение зарядов) в проводнике прекращается, его магнитное поле исчезает.

Вывод второй: чем сильнее ток в проводнике, тем более сильным магнитом становится этот проводник.

Глубокие исследования привели к ещё более категоричному выводу: никакого самостоятельного магнетизма мы не наблюдали, магнетизм, магнитное поле порождается электричеством, магнитные свойства появляются у движущихся электрических зарядов, и только у движущихся электрических зарядов.

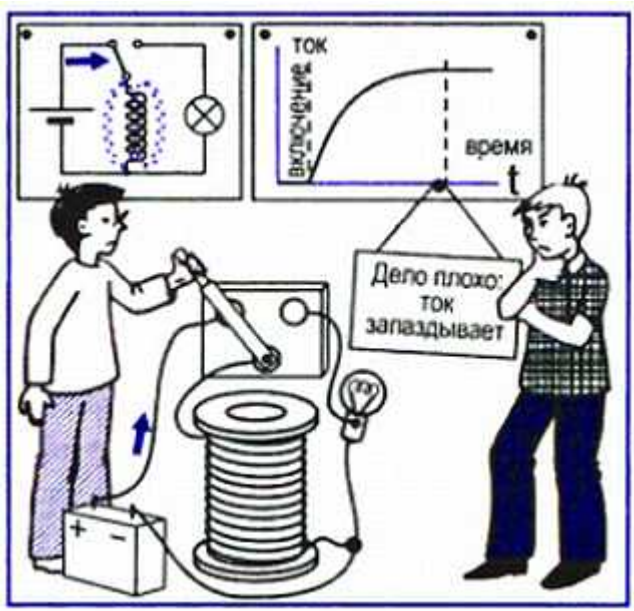
Но откуда же тогда берутся магнитные свойства у постоянного магнита, который спокойно лежит на столе и ни в какую электрическую цепь не включён? Что создаёт магнетизм у намагниченного железного стержня или у стрелки компаса? Их, оказывается, тоже создаёт движение электрических зарядов, но на этот раз движение особое, внутреннее.

Каждый электрон сам по себе обладает некоторыми магнитными свойствами, они, видимо, связаны с особым внутренним движением его заряда. Электрон, как и большинство других атомных частиц, чем-то напоминает волчок, во всяком случае, имеет момент собственного вращения — спин. С ним, скорее всего, связано и внутреннее движение заряда, которое мы пока не можем представить себе наглядно, в виде какой-нибудь привычной модели. Но об этом движении уже многое известно, например, известно, как от спина зависит магнитный момент частицы. В частности, магнитный момент электрона в два раза выше, чем если бы заряженную частицу раскручивали «обычным

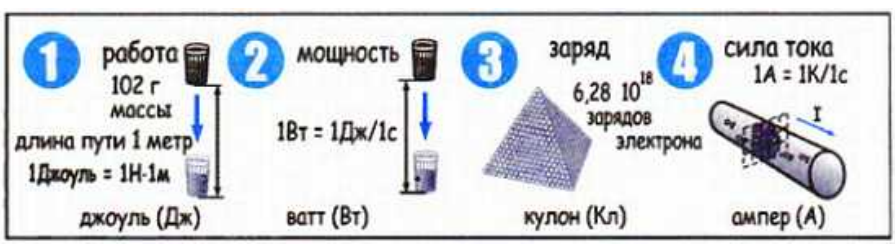
способом», например, закрепив на вращающемся волчке.

Так или иначе, отдельный электрон, где бы он ни находился, ведёт себя как некий микроскопический магнитик с явно выраженными полюсами. Под действием внешнего магнитного поля все магнитики-электроны несколько поворачиваются и вносят свой вклад в магнитную поляризацию всего физического тела, в частности, куска железа. Кроме того, в каждом атоме есть свои внутренние кольцевые электрические токи — движение электронов по орбитам. Именно эти орбитальные токи вместе с собственным магнетизмом электронов могут превратить атом в микроскопический магнит. В железе и некоторых других веществах (они называются ферромагнитными, от слова «феррум» — «железо») при объединении атомов в молекулы их магнитные поля складываются в значительно более крупных (по атомным масштабам) образованиях — в особых молекулярных комплексах, получивших название «магнитные домены» (от латинского «доминиум» — «владение»). Сильно упростив картину, можно считать магнитные домены элементарными магнитиками, благодаря которым существуют постоянные магниты. В не намагниченном железе элементарные магнитики (магнитные домены) расположены случайным образом, беспорядочно, а в намагниченном железе действуют согласованно, формируя сильное поле постоянного магнита и его полюсы.

Конечно, в действительности всё происходит не так-то просто, но результат именно такой — постоянные магниты своими магнитными свойствами в итоге тоже обязаны движению зарядов. Пытаясь подвести итог и несколько утрируя ситуацию, скажем так: пластмассовая палочка — это всего лишь пластмассовая палочка, натёртая пластмассовая палочка — это электрический заряд, и, наконец, натёртая пластмассовая палочка, если ею размахивать в воздухе, — это уже магнит.



ВК-101. *Уже знакомую нам э.д.с. самоиндукции (ВК-96) часто называют противоэ.д.с. Направление у неё всегда такое, что она противодействует изменениям тока в цепи. Например, при подключении к генератору какой-либо катушки, в ней вроде бы сразу должен появиться ток, определяемый по закону Ома. Но из-за противоэ.д.с. ток нужной величины появляется лишь через некоторое время — это генератор создаёт магнитное поле, которое непременно должно быть у катушки, по которой идёт ток.*



Р-35. ИЗМЕРЕНИЕ РАБОТЫ И МОЩНОСТИ, А ТАКЖЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА И ТОКА. Если мы поднимаем какой-либо небольшой груз (1), например полстакана молока, то вынуждены затратить на это перемещение снизу вверх определённую энергию, выполнить какую-то работу, преодолевая притяжение Земли. Если же мы дадим возможность поднятому стакану спокойно

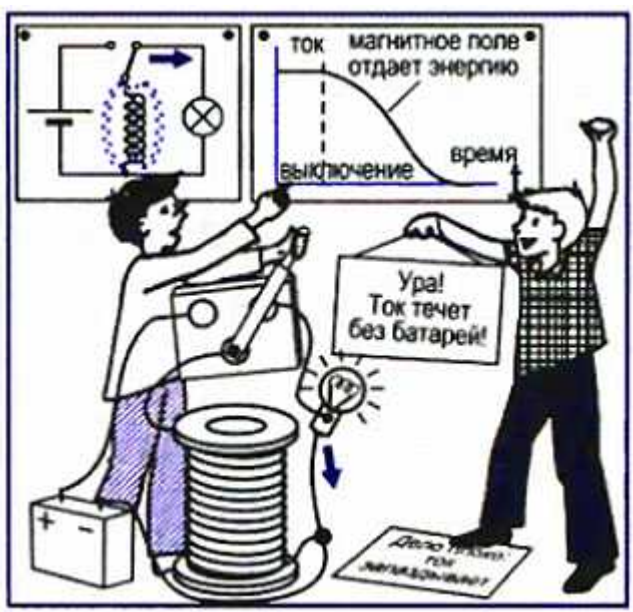
переместиться вниз (2), то он, используя притяжение Земли, сможет сам поработать на нас, выполнить какую-нибудь работу, например с помощью нитки поднять другой небольшой груз. Все это мы называем механическими действиями или движениями, затратой или получением механической энергии. Подсчитать проделанную работу несложно — нужно вес груза (силу его притяжения к Земле) умножить на пройденный им путь. Если хочешь узнать, насколько энергично велась вся эта механическая работа, воспользуйся общепринятой характеристикой «мощность», прикинь, сколько работы выполнено или сколько энергии получено за единицу времени — за 1 секунду (2). В электрических цепях, с которыми нам предстоит иметь дело, всё, как вам видится, происходит по-другому, но смысл самих характеристик «работа» и «мощность» не меняется. Возвращение в электрический мир мы начинаем с повторения того, что уже представил нам рисунок Р-20, — с количественной оценки электрического заряда (3) и силы тока в цепи (4), например в подключённой к генератору нагрузке. Силу тока точно называет заряд, проходящий через условный контрольный пункт за 1 секунду.

Т-92. **Магнитное поле всегда замкнуто.** Вокруг всякого движущегося электрического заряда существует уже не только электрическое поле, как вокруг неподвижного, но также магнитное поле, ещё одна особая форма материи, ещё одно невидимое, неслышимое, неосязаемое и в то же время прекрасно работающее Нечто. Чтобы убедиться в том, что в какой-то точке пространства есть электрическое поле, достаточно сунуть в эту точку пробный электрический заряд — если электрическое поле есть, то оно будет пытаться сдвинуть этот заряд с места. Обнаружить магнитное поле можно с помощью пробной магнитной стрелки — если магнитное поле есть, то стрелка будет поворачиваться в сторону действия магнитных сил.

Перемещая магнитную стрелку возле постоянного магнита, легко по разным её отклонениям заметить северный и южный магнитные полюсы, а также центральную область, где магнитные силы практически не чувствуются. Если же подобным способом исследовать пространство вокруг проводника, по которому идёт ток, то не удастся обнаружить никаких полюсов, то есть областей с особо сильным магнитным полем; перемещая стрелку вокруг

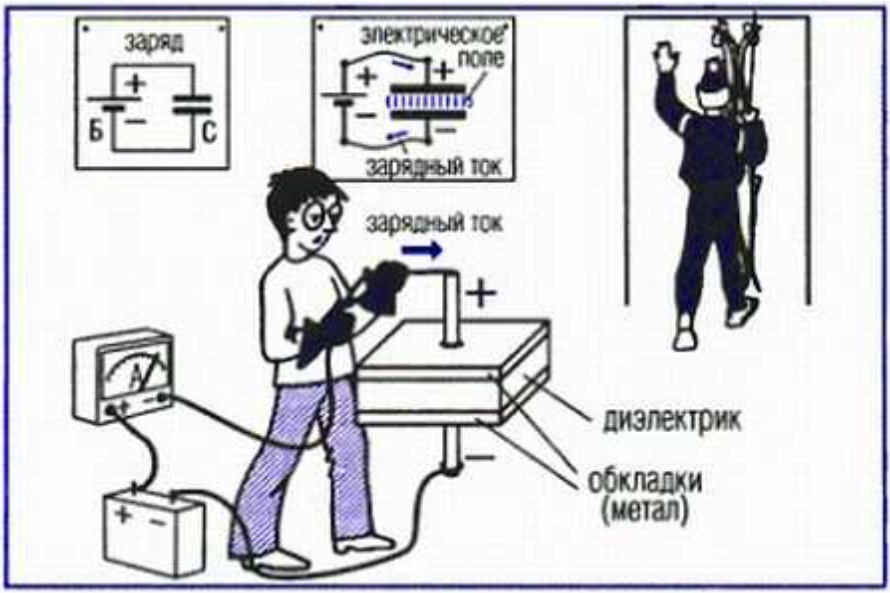
провода, мы увидим, что магнитное поле всегда замкнуто, что оно в данном случае напоминает бублик, у которого тоже нет начала и нет конца. Слово «замкнуто» надо понимать так: если двигать пробную магнитную стрелку в ту сторону, куда её поворачивает магнитное поле, то мы придём в ту же точку, из которой вышли. Этому факту можно дать хорошо известное уже объяснение — так устроен мир. Замкнутость магнитного поля — это его основное свойство, оно из той же серии, что и существование двух сортов электрического заряда и только одного сорта массы.

Замкнуто не только магнитное поле проводника с током, замкнуто вообще любое магнитное поле, созданное любым магнитом. В этом нетрудно убедиться, используя давний и очень простой способ наблюдения за магнитным полем. Накройте магнит стеклом и сверху насыпьте на это стекло железные опилки. Под действием магнитного поля они, подобно мельчайшим магнитным стрелочкам, растянутся вдоль невидимых до этого линий, соединяющих северный полюс магнита с южным.



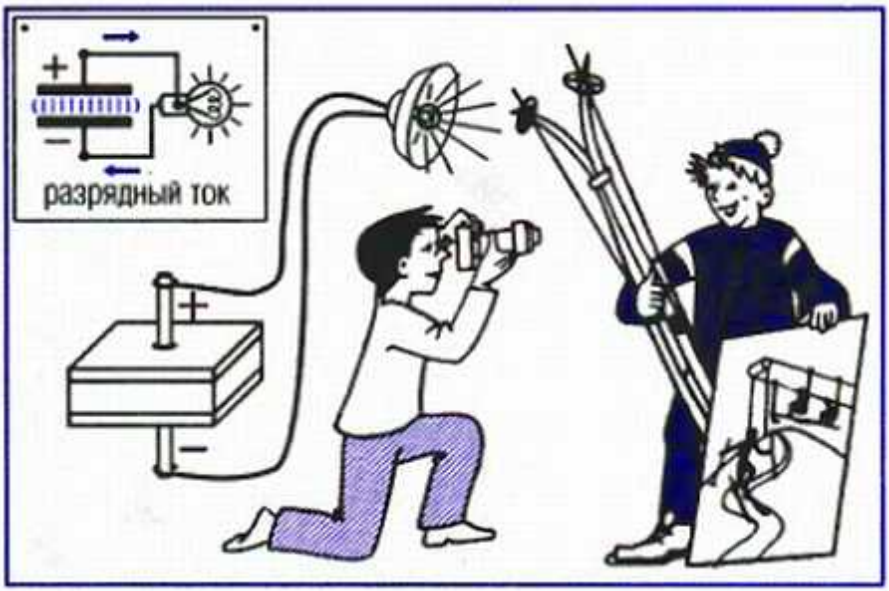
ВК-102. *При отключении катушки от генератора ток в её цепи сразу не прекратится, он будет и после отключения генератора существовать ещё какое-то время, не получая энергии ниоткуда, кроме собственного магнитного поля. Это противоэ.д.с., оправдывая своё название, опять же будет мешать изменениям тока — в данном случае его уменьшению до нуля после*

отключения катушки от генератора. Катушка — пример элемента электрической цепи с довольно сложным поведением. Другой пример — конденсатор.



ВК-103. *Конденсатор — это элемент электрических цепей, его основа — две металлические пластины (их называют обкладками), между которыми находится слой изолятора, например воздуха. Из-за этого изоляционного слоя конденсатор постоянного тока не пропускает. Но если изменить напряжение, которое подводится к обкладкам, то изменится и количество электрических зарядов в них — в одной обкладке «плюс», в другой «минус». В этот момент в цепи конденсатора (не проходя через изолятор) пойдёт ток.*

ВК-104. *Зарядка конденсатора предполагает подключение его к источнику постоянного напряжения, увеличение за счёт этого электрического заряда в обкладках и рост напряжения между ними. Энергия, затраченная на зарядку, хранится в электрическом поле между обкладками. Если отключить от источника напряжения заряженный конденсатор, и он в своём электрическом поле будет долго хранить энергию, главное — уберечь его от саморазряда. Например, через воздух, в котором есть немного свободных зарядов.*

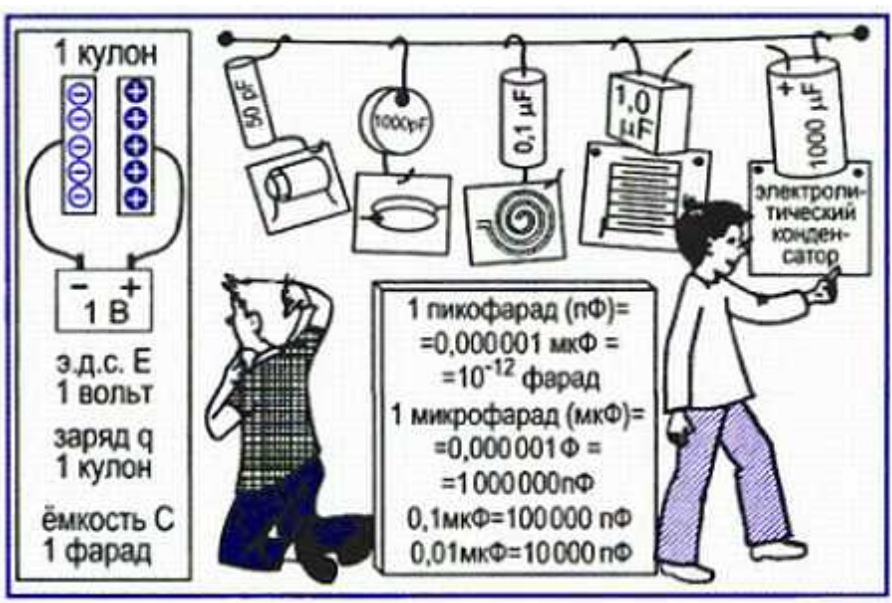


ВК-105. *Заряженный конденсатор по команде в виде импульса тока мгновенно отдаст накопленную энергию, и в виде такого хранилища электрической мощности он нашёл немало применений. А специалисты по электромобилям работают над созданием конденсаторов очень большой ёмкости (ВК-106), которые часто называют ионисторами. В нужный момент ионисторы подключатся в помощь аккумуляторной батарее и помогут резко увеличить скорость машины или выполнить иную тяжёлую работу.*

Хотелось бы обратить ваше особое внимание на слова «невидимых до этого линий». Линии магнитного поля невидимы потому, что их вообще нет — поле может меняться, но происходит это плавно, постепенно, и никаких сгущений поля в виде линий не возникает. Получившийся узор иногда называют магнитными линиями, или силовыми линиями магнитного поля. Но, ещё раз отметим, в самом магнитном поле никаких таких магнитных линий нет и не было. Опилки собираются в линии под действием нескольких, по существу дела, совершенно посторонних факторов, в том числе случайных. При другом размере опилок, другой силе их сцепления со стеклом, другой высоте их падения на стекло узор мог оказаться несколько иным, с чуть смещёнными «магнитными линиями». В главном же ничего не изменилось бы — получившийся «опилочный узор» своими линиями всегда, при любой форме магнита соединяет два его полюса. Соединяющие северный полюс с южным «опилочные

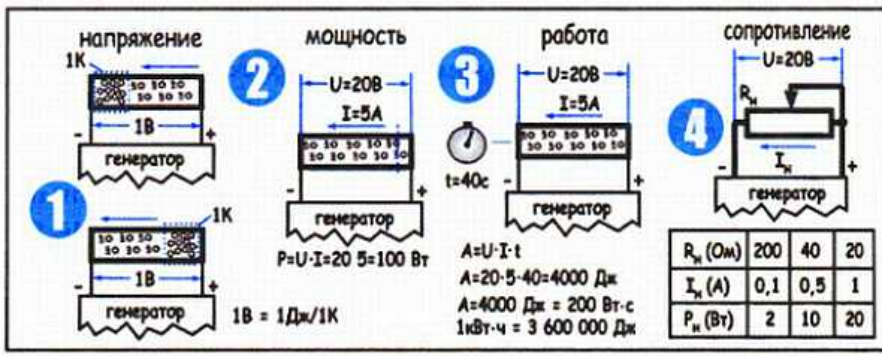
линии», если бы это было технически возможно, обнаружились бы и внутри магнита, ещё раз подтверждая, что магнитное поле всегда замкнуто, в данном случае и у постоянного магнита.

Т-93. **Нехитрое изобретение превращает проводник с током в стержневой магнит с явно выраженными полюсами — северным и южным.** Изучая окружающую нас физическую реальность, встречаешься с такими её чертами, на которые сразу повлиять невозможно, они вполне могли бы быть в хорошо знакомой нам серии «Так устроен наш мир». Невозможно, например, или скажем аккуратнее, пока невозможно сразу поверить, что создана антигравитация — не притяжение, а расталкивание двух масс. Невозможно ускоренно двигаться во времени вперед и раньше других заглянуть в будущее, как это с лёгкостью делают в фантастических романах. Невозможно отделить северный магнетизм от южного, получить магнитный монополь, хотя физики пытаются найти его, а некоторые теоретики строят математические модели мира, в котором магнитный монополь должен быть. Но сплошь и рядом встречаются природные объекты или процессы, которые можно изменить так, чтобы они стали более удобными и полезными для человека. Посмотрите вокруг — все достижения техники, технологии, медицины появились потому, что думающие люди в своё время придумали какие-то изменения чего-то, встретившегося им в природе.



ВК-106. *А пока широко применяются конденсаторы с разным*

значением двух основных параметров — ёмкости (измеряется в фарадах) и допустимого рабочего напряжения (измеряется, конечно, в вольтах). При малой ёмкости обкладки выполнены в виде небольших дисков или трубок, а изолятор — керамика. При средней ёмкости обкладки и тонкая плёнка изолятора — это спирали длинных лент. А электролитическим конденсаторам большой ёмкости нужно вспомогательное постоянное напряжение.



Р-36. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ, РАБОТЫ, МОЩНОСТИ И СОПРОТИВЛЕНИЯ НАГРУЗКИ. С электродвижущей силой (э.д.с.) и напряжением мы впервые познакомились ещё на рисунке Р-20 и вынуждены были лишь назвать эти характеристики и оценить их с помощью тогда ещё не известного нам закона Ома. Сейчас мы уже можем сообщить, что единица э.д.с., или напряжения, вольт — это, по сути дела, энергетическая единица, она участвует в оценке той работы, которую выполняет электричество. Если на выходе какого-либо генератора напряжение U составляет 1 вольт, то этот генератор затрачивает на продвижение заряда в 1 кулон энергию в 1 джоуль (1). Эту энергию заряд при необходимости может отдать нагрузке, выполнив в ней работу в 1 джоуль. Напряжение ничего не говорит о том, сколько времени это будет происходить, об этом сообщает другая характеристика — сила тока **I**, она называет число кулонов, которые проходят по цепи за 1 секунду. Зная обе эти величины — работу каждого кулона (**U**) и число кулонов, работавших в течение секунды (7), — мы как раз и узнаем мощность (**P**) — электрическую работу за секунду (2). Ну а зная мощность и время t, в течение которого велась работа **A**, мы легко подсчитаем всю её. Иногда эту работу А удобно

представить не в джоулях, а в равных им ватт-секундах или в более крупных единицах киловатт-часах, каждый из которых в 3 600 000 раз больше джоуля (3).

Думая о столь известных и важных характеристиках, как напряжение и ток, не нужно забывать о скромном сопротивлении нагрузки $\mathbf{R_н}$, которое определяет ток в цепи (4) и таким образом влияет на основные процессы в ней.

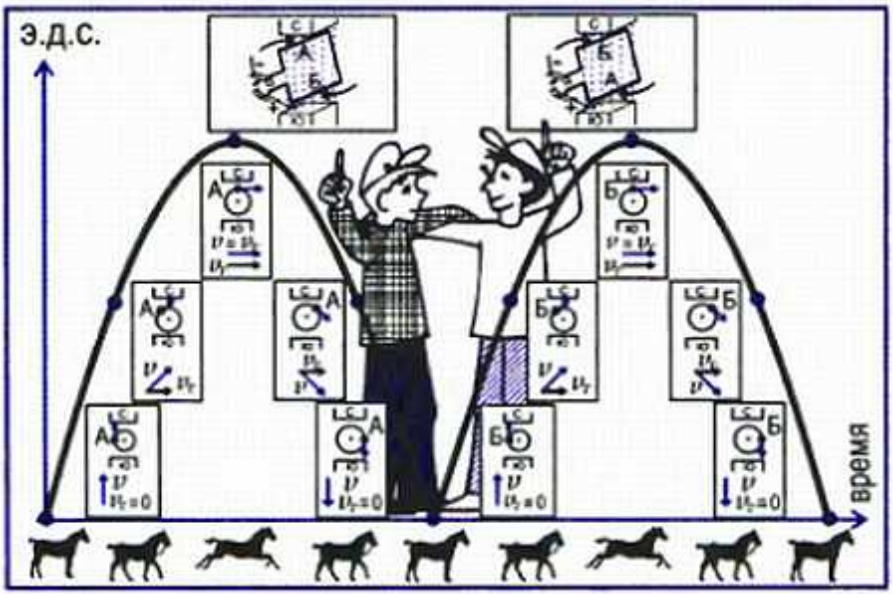
Мы видели, что магнитное поле проводника с током напоминает бублик (Р-44), оно окружает проводник и не имеет магнитных полюсов. А нельзя ли сделать это поле таким, как у стержневого магнита, — с явно выраженными северным и южным полюсами? Оказывается, что сделать это совсем несложно, мы сейчас просто мгновенно создадим такой стержневой электрический магнит, или коротко — электромагнит.

Чтобы всякий раз не путаться с дополнительными объяснениями, принято считать, что магнитное поле направлено в ту сторону, куда смотрит северный конец помещённой в это поле пробной магнитной стрелки.

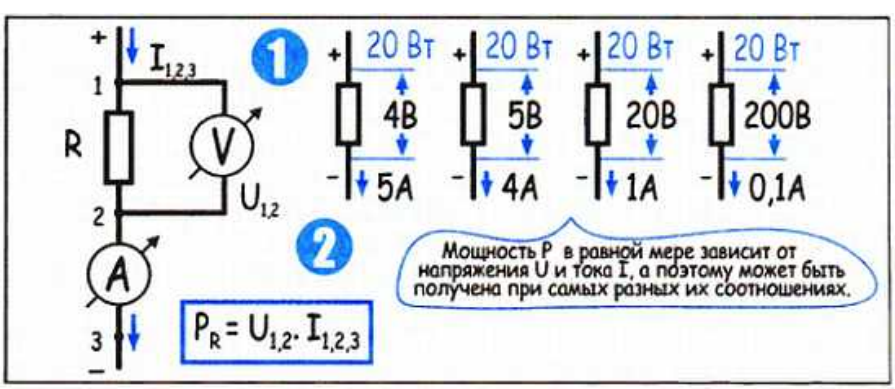
Кто-то когда-то придумал гениально простой способ складывания магнитных полей, которые создаются разными участками одного и того же проводника, — нужно просто свернуть проводник в кольцо (Р-44). Магнитное поле внутри такого кольца станет суммой магнитных полей многих согласованно действующих участков провода — их магнитные поля имеют одно и то же направление и поэтому суммируются. А если вдоль условной оси проволочного кольца с двух разных направлений приближать к этому кольцу стрелку компаса, то эта стрелка будет вести себя точно так же, как при взаимодействии с обычным стержневым магнитом.

***Т-94*. Катушка: ток последовательно проходит по нескольким виткам провода и их магнитные поля суммируются.** Свернув проводник в кольцо, удалось получить абсолютное подобие стержневого магнита, и теперь есть возможность познакомиться с ещё одним не менее простым и не менее гениальным изобретением. Можно, оказывается, во много раз увеличить магнитную силу кольцевого электромагнита, складывая магнитные поля нескольких витков. Причём по всем этим виткам можно пропускать один и тот же ток, сделав электрический магнит в виде многовитковой спирали. Такой спиралевидный элемент называют «катушка индуктивности», или просто «катушка», и на схемах обозначают его буквой *L*. Ясно, что

чем больше витков w у катушки, тем сильнее её суммарное магнитное поле. А кроме того, поле, как всегда, зависит от силы тока *I*, и поэтому способность катушки создавать магнитное поле иногда оценивают её ампер-витками (**I·w**) — произведением тока *I* в амперах на число витков *w*.



ВК-107. *Попробуем двигатель с рамкой в качестве ротора (ВК-95) превратить в генератор, создающий э.д.с. за счёт электромагнитной индукции. Для этого нужно вращать ротор (рамку) внешним двигателем, а вместо батареи включить вольтметр. Он покажет, что за первые полоборота наведённая э.д.с. росла, а затем падала — рамка с разной скоростью пересекала магнитное поле. В следующие пол-оборота сменилось направление проводников и одновременно тока — генератор выдал точно такую же э.д.с.*



Р-37. МОЩНОСТЬ ПРИ РАЗНОМ СООТНОШЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА. Все приведённые рисунки будут в дальнейшем помогать нам в непростом деле анализа и применения электрических схем. Но некоторые будут встречаться особо часто, какие-то из них стоит разобрать подробнее и запомнить навсегда. В числе таких особо нужных и этот рисунок, он напоминает о том, что одну и ту же мощность **P** можно получить при самых разных соотношениях напряжения **U** и тока **I** (1). Понимание этой простой истины привело к тому, что электроэнергетика ежегодно сберегает триллионы рублей, долларов, иен и прочей валюты. Об этом мы конкретно поговорим позже, а пока посмотрите, как в простой цепи получают одну и ту же мощность при разных напряжениях и токах (2). Из формулы **P = U·I** уже известным нам способом (Р-24) можно получить пару полезных расчётных формул, и ещё одну пару таких формул можно получить, заменив **U** или **I** их значениями, взятыми из закона Ома.

***Т-95*. Ферромагнитные и парамагнитные вещества в разной степени усиливают магнитное поле, диамагнитные ослабляют его.** Можно в сотни и даже в тысячи раз усилить магнитное поле катушки, если вставить в нее сердечник из так называемых ферромагнитных веществ. К их числу относится сталь (железо), никель, кобальт, а также некоторые специальные сплавы и специальная керамика, содержащая окислы железа. Внешнее магнитное поле действует на магнитные домены ферромагнитного вещества таким образом, что их магнитные полюсы поворачиваются в одну сторону, всё физическое тело поляризуется, само становится магнитом, который может оказаться во много раз сильнее внешнего поля, созданного током в катушке.

Число, которое показывает, во сколько раз в том или ином веществе реальные магнитные силы превышают магнитные силы, созданные самой катушкой, называют относительной магнитной проницаемостью, обозначается она греческой буквой μ — «мю» (Р-46). У стали магнитная проницаемость μ около 7500, и это значит, что внутри стального сердечника, вставленного в катушку, магнитные силы поворачивали бы магнитную стрелку (стрелка внутри стального сердечника — это, конечно, мысленный эксперимент) в семь тысяч раз сильнее, чем внутри

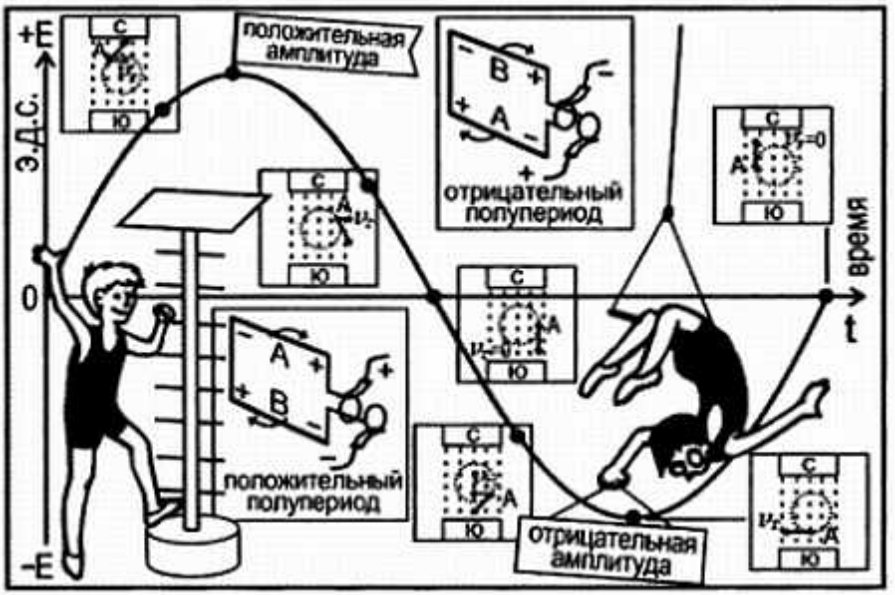
той же катушки, но без сердечника. Если в катушку вставлен стальной или иной ферромагнитный сердечник, то магнитное поле значительно усиливается не только в самом сердечнике, но и во всей области вблизи катушки. Потому что к магнитному полю катушки добавляется значительно более сильное магнитное поле намагнитившегося сердечника, этого уже, по сути дела, сильного постоянного магнита.

В электромагнитах практически всегда есть стальной или иной ферромагнитный сердечник, и именно к катушке с сердечником чаще всего относится само название «электромагнит».

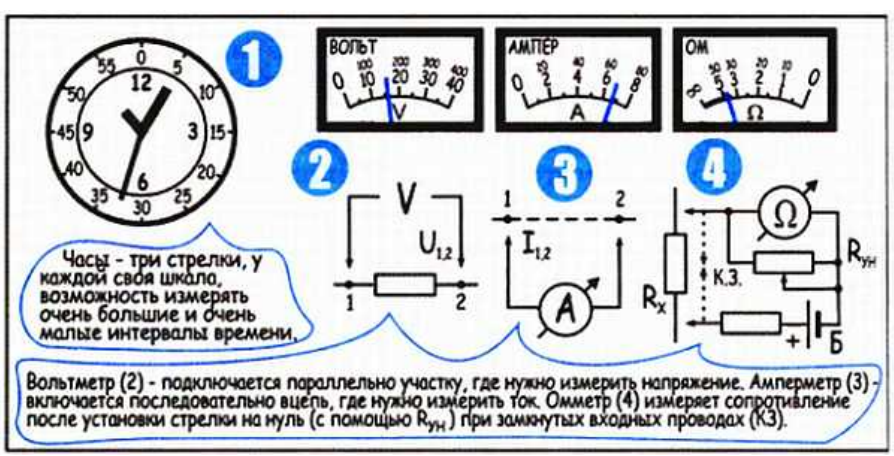
Все остальные вещества, кроме ферромагнитных, делятся на две группы — диамагнитные и парамагнитные, и те и другие незначительно (на малые доли процента) влияют на реальные магнитные силы. При этом парамагнитные вещества незначительно усиливают магнитное поле, а диамагнитные незначительно ослабляют его.

Т-96. **Основные характеристики магнитного поля — напряжённость *H*, магнитная индукция *B* и магнитный поток *Ф*.** Мы затратили довольно много усилий на знакомство с электрическими явлениями, с процессами в электрических цепях. Хочется верить, что это было интересное знакомство, но во всех случаях это было знакомство полезное. Можно даже сказать, необходимое. Потому что любой электрический аппарат, любая электрическая система — это прежде всего не что иное, как электрическая цепь. И, как уже не раз отмечалось, чувствовать себя свободно и легко в электрическом мире может только тот, кто глубоко понимает законы электрических цепей.

Во многих электрических приборах и установках работает не только электричество, но и магнетизм, однако, как правило, нечасто приходится разбираться в магнитных устройствах и процессах столь же детально, как в электрических. И всё же очень полезно иметь хотя бы самое общее представление не только о физической сущности важнейших магнитных процессов, но и о некоторых магнитных характеристиках и единицах их измерения.



ВК-108. *Теперь вместо переключателя с двумя полукольцами поставим два контактных кольца — одно соединим с началом рамки, другое с её концом. В результате после первой половины оборота наведённая э.д.с. сменит полярность — «плюс» и «минус» поменяются местами. После окончания второй половины оборота всё начнётся сначала. И вывод: мы получили генератор переменной э.д.с. Одну из её полярностей (условно положительную) откладываем вверх от горизонтальной оси, другую (отрицательную) — вниз.*



Р-38. ПОПРОБУЕМ ЗАГЛЯНУТЬ В НЕВИДИМЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МИРЫ. Главная особенность всех

электрических систем в том, что мы не видим и очень часто даже не представляем себе, что в них происходит, как они работают. В попытках понять, что именно происходит в конкретных электрических машинах, неоценима помощь специальных измерительных приборов: вольтметра, амперметра и омметра. Как обещают сами названия, эти приборы позволят измерить напряжение и ток в каком-либо участке цепи и реально действующее сопротивление этого участка. Внимательный читатель уже, видимо, заметил, что амперметр включается последовательно в цепь, где нужно измерить ток (3), а вольтметр подключается параллельно участку, на котором измеряют напряжение (2). Что же касается сопротивления, то его лучше всего измерять при полном отключении от цепи, в которой протекает ток (4). Попутно отметим, что сопротивление амперметра должно быть как можно меньше, чтобы он при включении в минимальной степени влиял на измеряемый ток. Сопротивление вольтметра, напротив, должно быть как можно больше, чтобы прибор не снижал сопротивление участка, на котором измеряется напряжение. Омметр оценивает измеряемое сопротивление $\mathbf{R_X}$ по величине тока, который создаёт в цепи небольшой собственный гальванический элемент **Б**, расположенный внутри омметра.

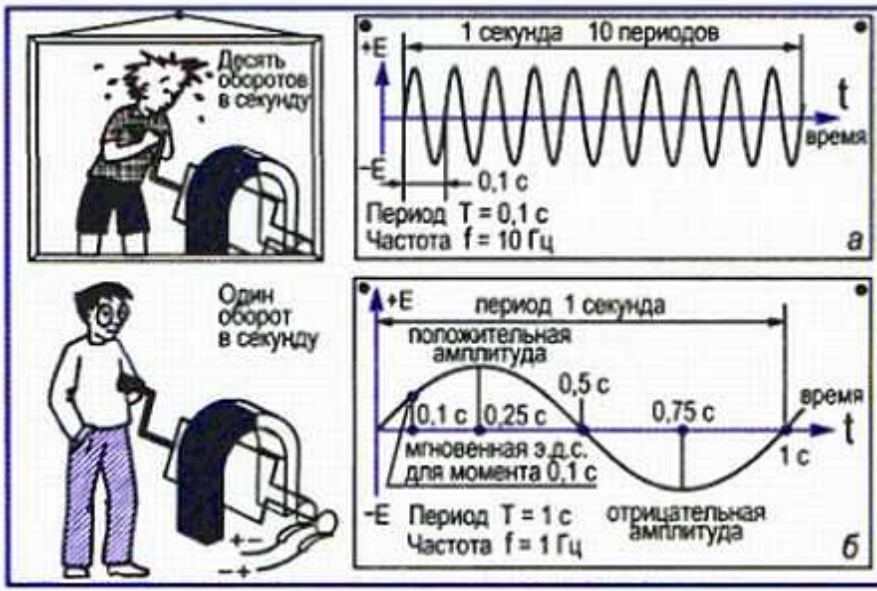
Первым на рисунке показан хорошо всем известный прибор для измерения времени — часы (1). В данном случае мы видим три стрелки и три шкалы для отсчёта часов, минут и секунд. Это огромное удобство, оно позволяет замечать и крупные интервалы времени (часы), и мелкие (секунды, каждая длится в 3600 раз меньше часа). На рисунках вверху показаны электроизмерительные приборы, которые, судя по шкале, используют тактику часов и тоже могут измерять как большие, так и малые величины напряжений, токов и сопротивлений. Как это делается, пояснит следующий рисунок.

Когда нам понадобились единицы измерения электрических характеристик — напряжения, тока, сопротивления, мощности, — то мы начали с минимальной порции электрического заряда, с электрона. Из него была сформирована реальная единица заряда (кулон), и дальше уже всё пошло легко и просто, мы легко ввели

единицы измерения и оценки величины тока, напряжения, сопротивления, энергии и мощности: ампер, вольт, ом, джоуль, ватт.

С единицей магнетизма дело обстоит сложней. Во всяком случае, сделать эталоном магнитные свойства единичного электрона или какой-либо атомный кольцевой ток было бы слишком сложно. Одна из основных магнитных единиц — напряжённость магнитного поля *H*, она говорит о том, с какой силой магнитное поле в данной точке действовало бы на определённый пробный магнит, а конкретно на проводник с током 1 А. При этом предполагается — и это очень важно, — что дело происходит в вакууме и свойства среды на действие поля не влияют. Поэтому можно считать, что напряжённость поля *H* — это абсолютно личная характеристика магнита или электромагнита (Т-8), она говорит только о его собственных возможностях, о том, какие силы могли бы действовать в его магнитном поле. Единица напряжённости — ампер/метр (произносится «ампер-на-метр), сокращённо А/м. Магнитное поле с такой напряжённостью появляется на расстоянии 16 сантиметров от проводника, по которому идёт ток 1 ампер.

Итак, напряжённость *H* говорит о том, что могло бы делать магнитное поле в вакууме, без учёта влияния среды, в которой реально действуют магнитные силы. А между тем влияние среды, как мы уже отметили, может быть очень сильным, она, в частности, может в сотни и тысячи раз усиливать действие магнитного поля. Поэтому вводится ещё одна характеристика — магнитная индукция *B*, она говорит о том, с какой силой магнитное поле действует в данной точке реально, с учётом среды. Естественно, что магнитная индукция *B* зависит от исходной, от первичной характеристики поля, от его напряжённости *H*: чем больше *H*, тем во всех случаях больше индукция *B*. При этом влияние среды учитывается с помощью особого коэффициента магнитной проницаемости μ (Р-46). Сделав все необходимые упрощения и приняв во внимание нужные числовые коэффициенты, можно записать $\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H}$ и, заглянув в таблицу, определить, что один и тот же источник магнитного поля при неизменной его напряжённости *H* будет создавать в стальном сердечнике ($\mu = 7500$) в несколько тысяч раз большую магнитную индукцию *B*, чем в воздухе, где практически $\mu = 1$. Или иными словами, магнитное поле будет действовать в стали в 7500 раз сильнее, чем в воздухе.



ВК-109. *Первые две особо важные характеристики переменной э.д.с. и тока — их период и частота. Период* ***T*** *— это время в секундах, за которое происходит один полный цикл изменений переменной э.д.с. или тока. Частота* ***f*** *— это число периодов за одну секунду. Единица частоты — 1 герц (Гц), он соответствует одному периоду в секунду. На рисунке приведено два примера: в одном период составляет 0,1 секунды и частота соответственно 10 герц; во втором примере период равен 1 секунде и частота 1 герц.*

Р-39. КАК ОДИН ПРИБОР ПРЕВРАТИТЬ В ДВА, ТРИ, ЧЕТЫРЕ ИЛИ ДАЖЕ В ПЯТЬ ПРИБОРОВ. Стационарные измерительные приборы, контролирующие работу больших установок, как правило, не делают пригодными для измерения очень больших и очень малых

напряжений или токов. Даёт генератор напряжение 220 В, и вольтметр рассчитан на 250 В, большего напряжения (да и такого тоже) просто автоматика не допустит. Другое дело — прибор для мастера-ремонтника или для любителя электрических схем. Им приходится измерять самые разные напряжения, токи и сопротивления, а носить с собой много разных приборов неудобно, да и просто тяжело. Для них, для этих людей, и выпускаются многопредельные приборы. Представьте себе, что у вас есть вольтметр, у которого стрелка отклоняется до конца при напряжении 1 В. У такого прибора уже при напряжении 1,1 В стрелка «зашкалит», то есть перейдёт допустимую границу. Но этим же прибором можно измерять и в десять раз большие напряжения, если включить последовательно с ним гасящее сопротивление, на котором будет оставаться 9 В из десяти, а сам прибор получит не более чем свой вольт. Точно так же можно увеличить предел измерений до 100 В, если подобрать гасящее сопротивление, на котором будет оставаться 99 В при измерении сотни. Используя систему переключаемых гасящих сопротивлений, можно получить многопредельный вольтметр и омметр (1,3), то есть вместо одного стрелочного прибора как бы получить несколько.

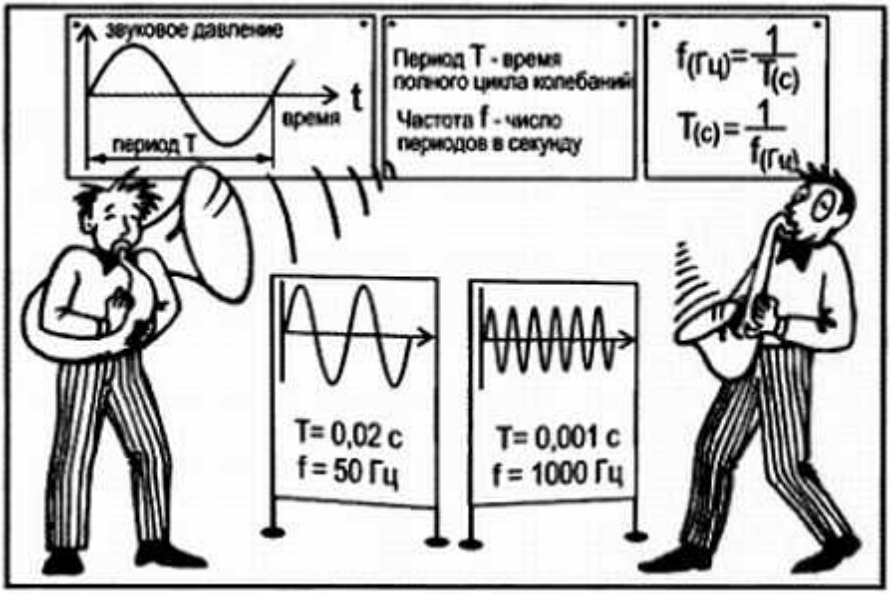
Аналогично можно создать и многопредельный амперметр, если параллельно стрелочному прибору (иногда его называют измерительной головкой) подключать шунты — сопротивления, по которым определённая часть измеряемого тока пройдёт мимо прибора (2). Так, если стрелочный прибор может измерить ток до одного миллиампера, то им можно будет измерить ток 100 мА, если параллельно измерительной головке включить шунт, по которому мимо прибора пройдёт 99 мА из этой сотни. Тем, кому кажется странной показанная на рисунке система переключения шунтов, сообщаем, что она появилась в результате трагических ошибок, о которых напоминает фольклор профессионалов: «Не оставляй прибор без шунта». Когда-то применяли простую систему переключения шунтов, в которой сама головка на какие-то доли секунды, необходимые для срабатывания переключателя, оказывалась включённой в цепь без шунтов и мгновенно выходила из строя из-за большого тока. В показанной на рисунке (2) одной из безопасных

схем, шунты всегда включены в цепь, а переключатель лишь подключает стрелочный прибор к нужной части шунта.

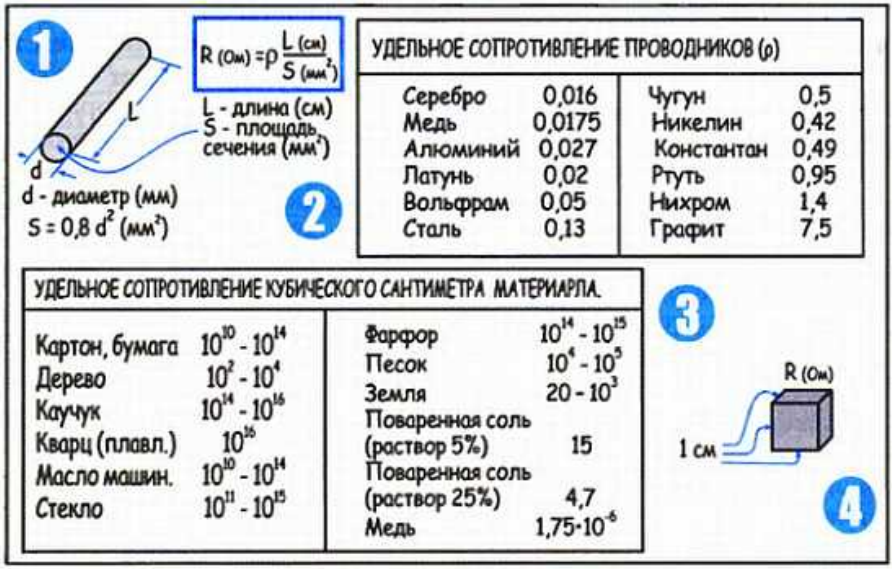
Т-97. **Путь, по которому замыкается магнитное поле, часто называют магнитной цепью**. Можно провести полезную аналогию между электрической цепью, по которой идёт ток, и тем путём, тем «бубликом», по которому замыкается магнитное поле. Роль генератора в такой магнитной цепи играет сам магнит или электромагнит — катушка (или катушка с сердечником), по которой идёт ток и которая создаёт изначальное магнитное поле. А само размазанное в пространстве и всё же в основном сконцентрированное между полюсами магнитное поле, сам магнитный поток *S*, который как бы выходит из северного полюса магнита и входит в южный, чем-то напоминает электрический ток во внешней электрической цепи, например в цепи хорошо знакомого нам карманного фонарика (Р-25). Если ещё ввести характеристику с условным названием «магнитное сопротивление» $R_{магн}$, то она будет отображать влияние среды на величину магнитного потока — примерно так электрическое сопротивление проводника отображает его влияние на величину тока. Участки, где магнитный поток *S* проходит через сталь, имеют малое магнитное сопротивление, в сравнении с ним будет очень большим магнитное сопротивление участков, где магнитный поток проходит по воздуху.

Существует даже закон Ома для магнитной цепи, он имеет внешнее сходство с законом Ома для электрической цепи. Так, например, отмечается, что магнитный поток пропорционален так называемой магнитодвижущей силе, м.д.с. В случае если магнитный поток создаётся электромагнитом, то магнитодвижущая сила будет тем больше, чем больше его ампер-витки (Т-94), то есть чем больше витков в обмотке (катушке) электромагнита и чем более сильный ток идёт по этой обмотке. И дальше: чем больше м.д.с., тем более сильное магнитное поле она создаёт — тем больше напряжённость магнитного поля *H*, тем, естественно, больше магнитная индукция *B*, и вместе с ней больше становится магнитный поток *Ф*. Последнее напоминает то, что происходит в электрической цепи, когда с увеличением э.д.с. и согласно закону Ома возрастает ток в цепи. Кроме того, магнитный поток обратно пропорционален магнитному сопротивлению — если полюсы магнита, который находился в воздухе, замкнуть магнитопроводом из стали, то резко (в 7500 раз) уменьшится магнитное сопротивление цепи и практически во

столько же раз увеличится магнитный поток *Ф*.



ВК-110. *Эти две характеристики — частота и период переменного тока — лучше других понятны и близки человеку, особенно если он хоть немного занимался музыкой. Мы просто чувствуем частоту, слышим и различаем звук разных частот, понимаем оценки типа «частота выше». Конечно, общаясь с электричеством, мы будем встречаться с частотами, более высокими и более низкими, чем слышимые (от 20 до 20 000 герц), но поведение электрических схем на разных частотах приучит нас и к их частотным особенностям.*



Р-40. ПО СУММЕ ДОСТОИНСТВ НА ПЕРВОМ МЕСТЕ МЕДЬ. Все используемые в электротехнике материалы можно грубо разделить на две группы — проводники (2) и изоляторы (3). Изоляторы, естественно, имеют очень большое сопротивление, свободных зарядов в них настолько мало, что для пропускания тока порядка ампера понадобится резиновый или пластиковый «провод» скорее всего километрового диаметра.

Проводники выполняют в электротехнике много разных работ, но чаще всего они используются для транспортировки электричества, так как сравнительно легко пропускают ток, то есть отбирают у него малую часть энергии. При малых расстояниях этими потерями вообще пренебрегают, например, в переносном фонаре (Р-25) или даже в квартире. Но часто сопротивление соединительных проводов нужно знать — оно не должно оказаться слишком большим и оставить истинную нагрузку с недостаточным напряжением. Подсчитать сопротивление провода несложно (1). В расчётной формуле коэффициент ρ — это удельное сопротивление, его можно найти в справочной таблице (2), и говорит оно о свойствах металла, из которого сделан провод. Просмотрев таблицу, сразу хочется выбрать серебро — у него коэффициент ρ меньше, чем у всех, и, значит, сопротивление провода будет минимальным. Однако серебро используют при создании проводов лишь в

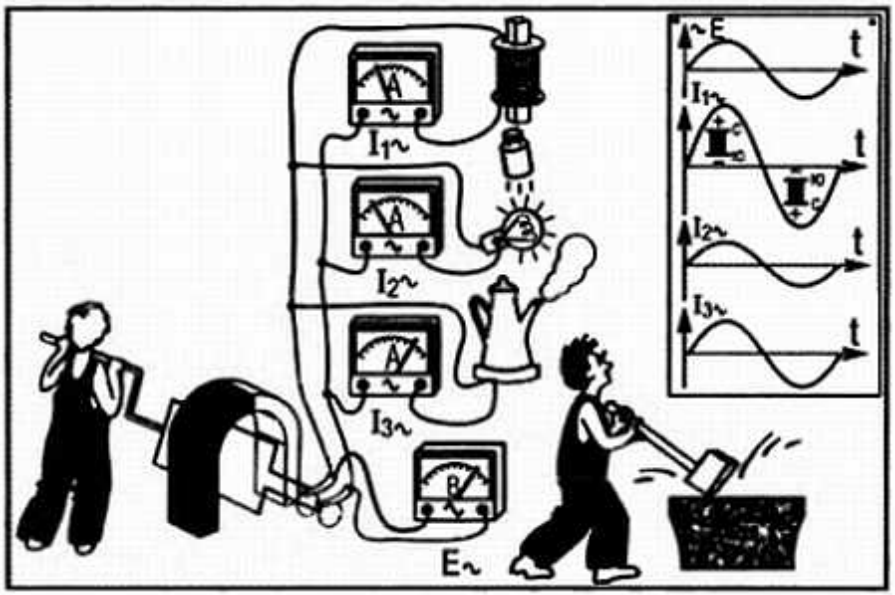
исключительных случаях — дороговато. На первом месте второй претендент — медь. И не только из-за своего малого ρ, у меди много других ценных качеств, в частности пластичность. Там, где возможно, медь заменяют алюминием, у него удельное сопротивление ρ в 1,5 больше, но зато стоимость в три с лишним раза меньше. В поисках замены свою роль играет и предупреждение геологов о том, что сырьевые запасы алюминия практически неограниченны, а при нынешнем потреблении меди её разведанных запасов хватит всего лишь на 60 лет.

Сравнение магнитной цепи с электрической приводит к некоторым очень важным практическим выводам. Бот один из них: если в замкнутой магнитной цепи из стали сделать небольшой воздушный зазор, то он резко увеличит общее магнитное сопротивление цепи и заметно ослабит общий магнитный поток — так участок с большим сопротивлением, последовательно включённый в электрическую цепь, резко увеличивает её общее сопротивление и, следовательно, резко уменьшает ток в цепи.

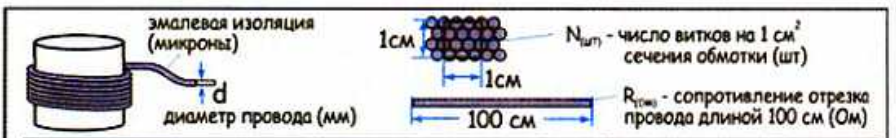
Очень важно, что при появлении воздушного зазора в стальной магнитной цепи уменьшится и магнитная индукция в самой стали — это результат ослабления общего магнитного потока. А если параллельно воздушному зазору создать дополнительный путь с меньшим магнитным сопротивлением (Р-35.7), например, приложить к зазору тонкую стальную пластинку, то магнитное сопротивление участка уменьшится — так уменьшалось сопротивление участка электрической цепи при его шунтировании. При введении магнитного шунта основной магнитной поток пойдёт по пути наименьшего магнитного сопротивления, то есть пойдёт через магнитный шунт. Вспомните, при шунтировании участка электрической цепи малым сопротивлением основной ток тоже идёт через шунт.

***Т-98*. В электрических приборах и аппаратах часто встречаются магнитные элементы**. Читатель довольно долго пробирается через трудные разделы книги, посвященные основным явлениям и общим законам электрического мира. Сейчас уже, пожалуй, можно порадоваться: мы заметно приблизились к для многих более лёгким и более приятным описаниям конкретных машин и приборов. До сих пор у нас была лишь одна конкретная электрическая машина — любимый наш карманный фонарик. Сейчас, завершая общее знакомство с

магнитными цепями, уместно вспомнить о нескольких других конкретностях, предвещая этим многие приятные встречи уже недалекого будущего.



ВК-111. *В начале 1900-х годов, когда активно начали строить электростанции, возникли споры о том, на какой основе развивать электроэнергетику — на основе постоянного (главный сторонник Эдисон) или переменного тока. И только когда великий изобретатель Эдисон признался, что он был неправ, заслуженную победу переменного тока признали все. О его достоинствах мы ещё поговорим, а пока отметим вот что: в какую бы сторону ни двигались электроны, они создают тепло и магнитное поле, — переменный ток отлично работает в бытовых приборах.*



$d_{(мм)}$	$R_{(ом)}$	$N_{(шт)}$	$d_{(мм)}$	$R_{(ом)}$	$N_{(шт)}$	$d_{(мм)}$	$R_{(ом)}$	$N_{(шт)}$
0,05	9,29	18 000	0,18	0,69	2 070	0,49	0,093	310
0,1	2,23	5 700	0,2	0,56	1 700	0,55	0,074	260
0,12	1,55	4 000	0,31	0,23	750	0,64	0,055	190
0,14	1,14	3 200	0,41	0,15	440	0,8	0,035	125
0,16	0,87	2 500	0,44	0,11	390	1,56	0,0092	35

Р-41. С ЧЕГО НАЧИНАЕТСЯ МИЛЛИОН ПРОВОДОВ. Даже человеку, далёкому от электротехники, неплохо знать, что сегодня создание, транспортировка и использование электрической энергии — это гигантская индустрия. И в ней много своих самостоятельных областей со своей промышленностью, своими научными поисками, со своим огромным разнообразием изделий. Среди таких областей — провода и кабели, которых выпускаются тысячи разновидностей, каждая со своим названием. Достаточно пробежаться по нужному разделу Интернета, чтобы увидеть, как много в этой области самостоятельных направлений: провода и кабели сильноточные и для передачи слабых сигналов, провода круглого и прямоугольного сечения, специально для морских судов, для самолётов, для дачных построек и для высотных домов, для подземной и воздушной проводки, для стерильных медицинских помещений, для прокладки в химически агрессивных средах и многие десятки других. И совсем уже ошеломляющее впечатление производит бессчётное количество непонятных человеку со стороны названий проводов и кабелей, всех этих КГХЛ, АВБбШГ, НГП-30, СБПЕГ, ПЭШО, КУПЭЗ, КММ, РХ-50, КВВГ, РКТМ, ПЭПТ-В-100, БПВЛ, XLPE, ПУНП, ПТВВГ и много сотен, а скорее всего, тысяч других.

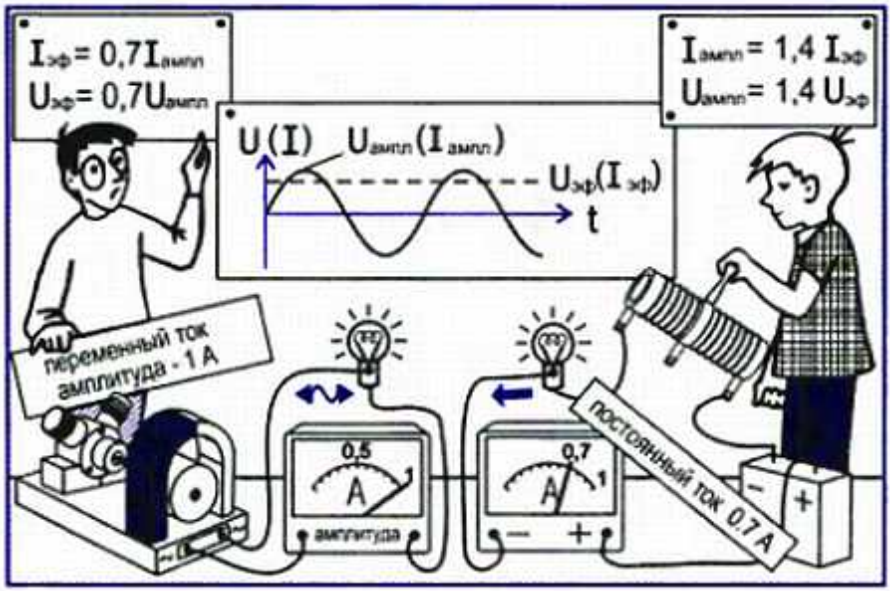
Первые сведения о медных проводах с шёлковой изоляцией относятся к 1810–1830 годам. С тех пор разного диаметра медный провод, покрытый тонким слоем изолирующей эмали, несмотря на множество появившихся помощников и конкурентов, остался самым распространённым путём для передачи электричества. Медный провод можно встретить в многочисленных современных кабелях, в обмотках генераторов, двигателей, трансформаторов и других электрических машин.

В электрических системах и аппаратах довольно часто встречаются чисто магнитные элементы, в частности магнитопроводы и разного рода электромагниты. Мы нечасто обращаем внимание на этих скромных тружеников электрического мира, ибо они как-то не очень заметно вплетены в сложные электрические цепи и, главное, редко отвлекают нас своими неисправностями.

На рисунке Р-47 показаны распространённые типы магнитопроводов — один из них (п-образный) напоминает две состыкованные буквы «п», второй (ш-образный) — две состыкованные буквы «ш», третий (кольцевой) — обычное кольцо. Во всех случаях магнитное поле создаётся катушкой *L*, внутри которой каким-то образом проходит магнитопровод, его принято называть сердечником катушки. Как правило, сердечники изготовлены из ферромагнитного материала, будем считать, что из стали. Магнитное поле везде замыкается по пути наименьшего магнитного сопротивления, то есть по магнитопроводу, при этом в самом магнитопроводе получается очень высокая магнитная индукция B и сильный магнитный поток *Ф*. В ш-образном сердечнике магнитный поток разветвляется, а затем вновь сходится в центральной части. А в одном из кольцевых сердечников имеется зазор, он, возможно, понадобился для того, чтобы подбором магнитного шунта установить в сердечнике необходимый магнитный поток.

Ещё один пример работающих магнитных зазоров — электромагнитное реле, упрощённо показанное на рисунке Р-49. Здесь стальная пластинка, именуемая якорем, находится на небольшом расстоянии от сердечника электромагнита и оттягивается от него пружиной. Как только в катушке *L* появляется ток, якорь намагничивается, притягивается к сердечнику, и контакты, закреплённые на якоре, замыкают или размыкают какую-либо электрическую цепь. С помощью реле можно слабым сигналом произвести переключения в мощных электрических цепях или одним сигналом производить большое число переключений.

И последний пример — электромагнит, позволяющий измерять силу тока в цепи. Небольшой стальной сердечник закреплён на двух пружинках и частично вставлен в катушку электромагнита. Когда в катушке появляется ток, сердечник намагничивается и постепенно втягивается в катушку, преодолевая сопротивление пружин. Чем больше ток, тем в большей мере сердечник преодолевает это сопротивление и втягивается в катушку всё глубже и глубже. К сердечнику прикреплена стрелка прибора, по её смещению можно определить, насколько сильный ток проходит по катушке, создавая магнитное поле. На этом принципе работают очень распространённые измерительные приборы электромагнитного типа — амперметры и вольтметры.

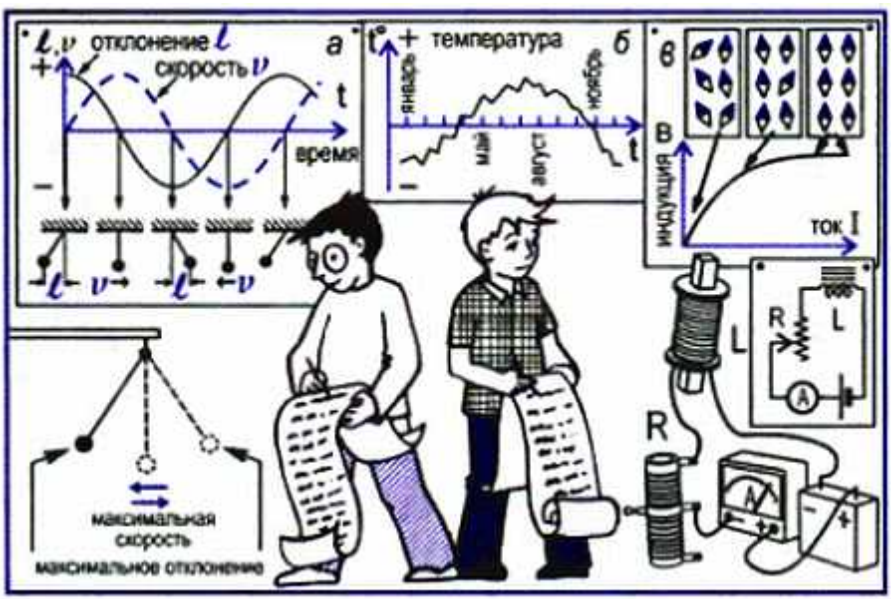


ВК-112. *О работоспособности переменного тока (э.д.с., напряжения) нельзя судить по его амплитуде — основную часть периода ток меньше амплитудного. О реальных возможностях переменного напряжения (тока) говорит его эффективное значение — условное постоянное напряжение с такой же работоспособностью. Эффективное напряжение (ток) в электросети составляет примерно 0,7, или иначе 70 %, от амплитуды. На электроприборах всегда указывают необходимое им эффективное напряжение и ток.*

Т-99. **Странное поведение ферромагнитного сердечника становится причиной некоторых неприятностей и в то же время основой для замечательных изобретений**. Попробуем провести мысленный эксперимент. Подключив катушку к источнику постоянной э.д.с. (Р-48), будем с помощью переменного сопротивления менять ток *I* в катушке, а вместе с ним и напряжённость магнитного поля *H*. При этом будем следить за тем, как меняется созданное катушкой магнитное поле, а конкретно магнитная индукция *B*, в какой-то определённой точке. Существуют специальные приборы для измерения магнитной индукции, но в мысленном эксперименте можно воспользоваться и простейшим приспособлением — подвешенным на нитке небольшим магнитиком, который тем сильнее притягивается к катушке, чем более усиливается её магнитное поле. Результат эксперимента нетрудно предсказать: по мере того как растёт ток, магнитное поле становится всё более

сильным, магнитная индукция B растёт, и не видно никаких ограничений этому росту. Если сменить направление тока, то направление поля изменится на противоположное и индукция B в выбранной точке всё так же будет возрастать с увеличением тока в катушке.

Теперь вставим в катушку стальной сердечник, в надежде увидеть всё то же самое, но в значительно усиленном варианте. И действительно, с увеличением тока магнитная индукция B резко возрастает, график зависимости B от тока идёт значительно круче, чем у катушки без сердечника. Но в какой-то момент этот быстрый рост замедляется и затем почти совсем прекращается — магнитная индукция с увеличением тока растёт так же медленно, как в первом опыте, то есть без сердечника. Объяснение достаточно простое: все магнитные домены («элементарные магнитики»), которые могли сориентироваться вдоль магнитного поля и усилить его, уже сделали это, процесс намагничивания сердечника вошёл в область насыщения.

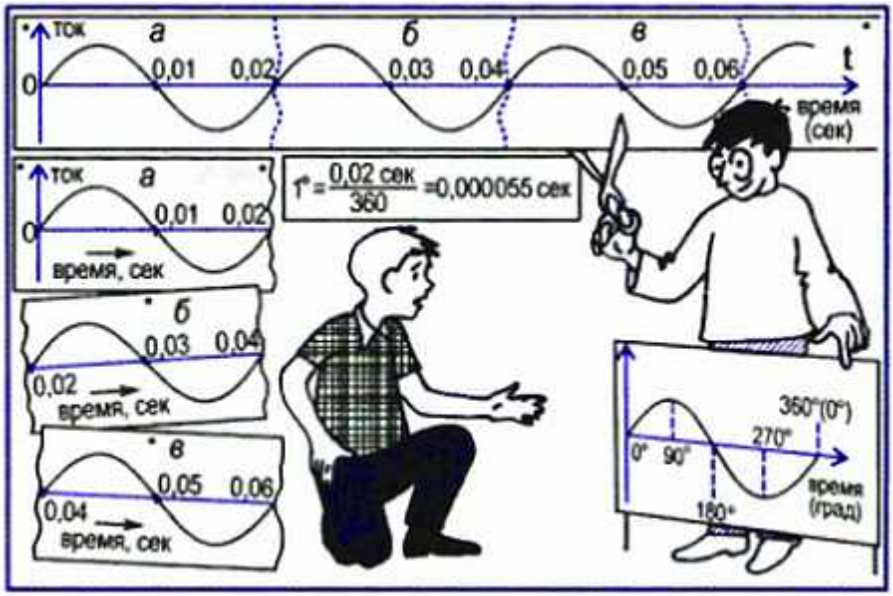


ВК-113. *Пора привлечь особое внимание читателя к тому, чем мы уже давно пользуемся, — к рисунку по имени «график». Он показывает, как одна какая-нибудь величина зависит от другой, например магнитная индукция от тока в катушке или температура воздуха от времени суток. Величину, от которой зависит процесс (аргумент), например время* ***t****, откладывают по горизонтальной оси, а ту, что зависит от неё (функция), — по вертикальной. График может о многом рассказать, если в него*

всмотреться и вдуматься.

Другая интересная особенность: если, уменьшая ток, довести его до нуля, то магнитное поле не исчезнет — какие-то магнитные домены как бы застрянут (Т-8) в новом своём положении, останутся поляризованными. Из-за этого у сердечника и после отключения тока будет собственная, остаточная намагниченность, остаточная магнитная индукция $B_{ост}$ — сердечник превратится в постоянный магнит. Чтобы размагнитить его, нужно приложить силу, которая «повернёт» домены, ликвидирует их поляризацию и вместе с ней остаточную намагниченность — уменьшит B до нуля. Такой силой может быть поле противоположного направления, созданное, соответственно, током противоположного направления.

Если, размагнитив сердечник ($B = 0$), увеличивать этот обратный ток, то можно вновь прийти к насыщению, а затем, уменьшая ток, получить остаточную индукцию $B_{ост}$, но уже при противоположной полярности магнитного поля. График полного перемагничивания стального сердечника называют гистерезисной петлёй, от греческого слова «гистерезис» — «отставание». Понимание процесса позволило сделать ряд важных выводов, в том числе исключительно ценных для техники. Один из практических выводов: размагничивание стальных деталей, например, в дорогих пружинных часах, которые вышли из строя из-за случайного попадания в сильное магнитное поле. Если стальной предмет медленно удалять от катушки, по которой идёт переменный ток, то сталь будет непрерывно перемагничиваться, переходя на всё более «мелкую» гистерезисную петлю, и на некотором расстоянии от катушки намагниченный стальной предмет размагнитится полностью.



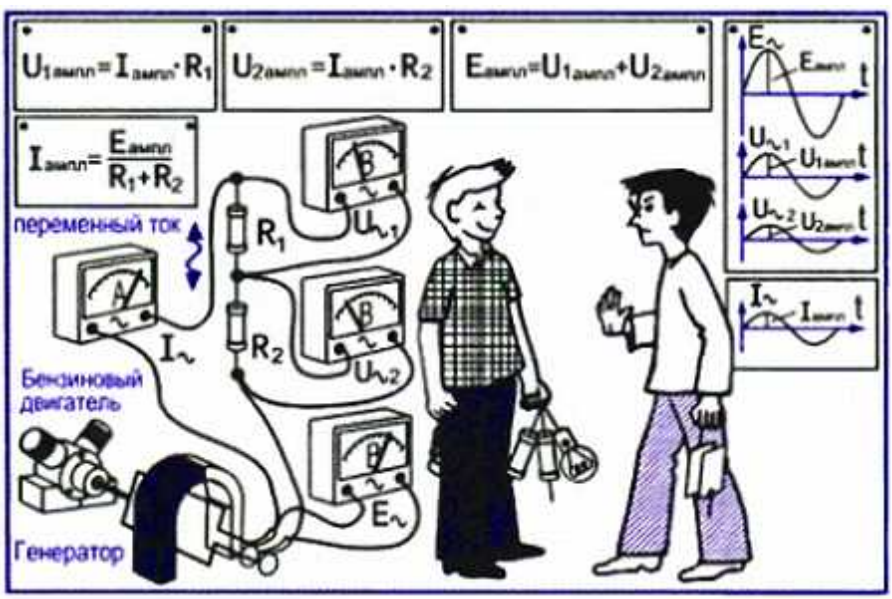
ВК-114. *Изменения переменного тока повторяются, график какого-либо периода в точности похож на предыдущий и на последующий, а чтобы разместить график за длительное время, нужна очень длинная лента. Поэтому принято пользоваться графиком одного периода, считая его пригодным для всех остальных. На нём время отсчитывают не в секундах, а в градусах, приняв, что один период длится 360 градусов (360°). Другие приметные моменты: 1/4 периода — 90°, 1/2 периода — 180° и 3/4 периода — 270°.*

Внешнее магнитное поле, а значит, и создающий его ток, затрачивают определённую энергию на каждый цикл перемагничивания стального сердечника. Из-за этого стальные детали, работающие в устройствах переменного тока (трансформаторы, электродвигатели, генераторы), создают определённые потери энергии, уменьшить их помогает глубокое понимание процессов перемагничивания.

И ещё одна встреча с процессами намагничивания ферромагнитных материалов — магнитная запись электрических сигналов. В наше время она используется исключительно широко: в магнитофонах и видеомагнитофонах, в нескольких разновидностях магнитной памяти компьютера, в разнообразных системах с кодами, записанными на ферромагнитной полоске пластиковых карточек. Например, на магнитной полоске электронного ключа к какому-либо электронному замку или на магнитной полоске вашей банковской карточки, где записан

номер вашего счёта и коды, позволяющие вам положить деньги на этот счёт или, наоборот, снять часть денег и получить их или перевести на другой счёт.

В принципе магнитная запись и считывание электрических сигналов осуществляются очень просто. К диамагнитному или парамагнитному зазору в магнитопроводе записывающей головки прилегает полимерная плёнка с тонким слоем ферромагнитного покрытия, и магнитный поток, естественно, в основном замыкается через это покрытие — через этот своего рода магнитный шунт. Плёнка равномерно движется мимо щели, и если в катушке электромагнита (записывающей головки) появится импульс тока, то кусочек плёнки, проходивший в этот момент над зазором, намагнитится, на плёнке останется магнитный след. Его можно обнаружить с помощью считывающей головки, в которой меняющееся магнитное поле (магнитная запись) наводит электрический сигнал. Так, на движущейся ферромагнитной плёнке можно записывать, хранить, а затем считывать самые разные электрические сигналы, например, электрическую копию звука или сложные цифровые коды.



ВК-115. *Для всей цепи переменного тока и для её участков действует такой же закон Ома, как и для постоянного тока. Но чтобы расчёты по его формулам давали правильный результат, нужно брать значения тока и напряжения для одного определённого момента времени, проще всего для их положительной амплитуды. Результат расчётов вы тоже*

получите в виде амплитудных значений. Они, бесспорно, будут правильными, но придумано более удобное представление переменных э.д.с., напряжений и токов.

Завершая первое знакомство с магнитными явлениями и магнитными цепями, напомним о главном. Электричество и магнетизм неразрывно связаны, и чрезвычайно важную, можно даже сказать, жизненно важную роль в их союзе играет движение. Вспомните, сами магнитные свойства появляются в результате движения электрических зарядов. Но это ещё далеко не всё. В следующей главе мы встретимся с новыми профессиями привычного слова «движение». В одном случае оно с помощью магнитов создаст электродвижущую силу, создаст мощные источники электричества, щедро питая всю планету электроэнергией. В другом случае электрическая энергия с помощью магнитов создаст мощное вращательное движение, заставит электричество работать в двигателях, выполнять механическую работу, столь нужную самым разным машинам — главным в наше время помощникам человека.

Глава 8
Парад великих превращений

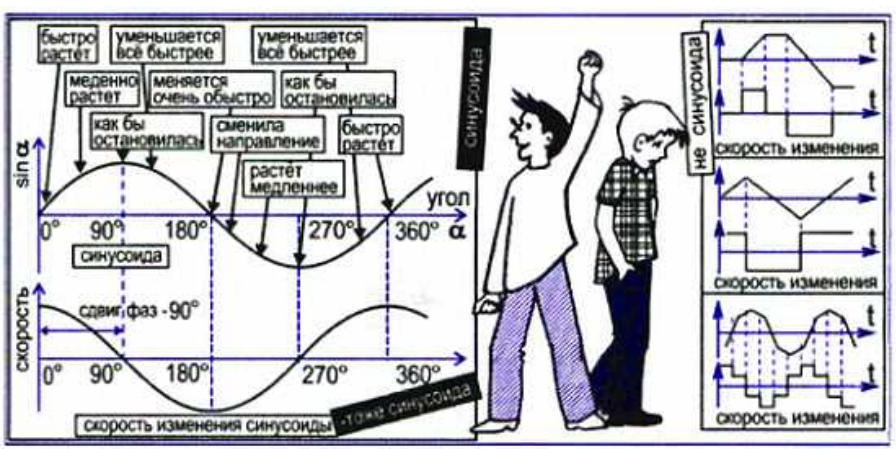
Человеку посчастливилось родиться и жить на планете с огромными доступными ему запасами энергии. Научившись добывать огонь, люди много тысячелетий получали энергию из того, что буквально валялось под ногами, — из дерева, древесины. Затем кое-где пошли в ход и другие энергетические консервы — уголь и нефть. Все эти источники энергии, сгорая, давали тепло и свет, что, конечно, сильно изменило жизнь наших далёких предков. Они уже могли спасаться от холодов и есть варёную пищу, сделав тем самым ещё один шаг вперёд из своей тяжёлой звериной предыстории. Но совсем по-иному заработало тепло, когда примерно 300 лет назад англичанин Томас Ньюкомен изобрёл и построил огромный паровой насос для откачки воды из шахты, — огонь показал, что может выполнять серьёзную механическую работу. А ещё через 80 лет Джеймс Уатт завершил создание универсальной паровой машины, она превращала тепловую энергию в непрерывное вращательное движение — началась эпоха машинного производства и транспортных машин. Это, конечно, была революция, человек получил помощников, которые могли работать вместо него, в том числе выполнять монотонную и очень тяжёлую, просто нечеловеческую работу. И совершенно новые возможности у работающих машин открылись после того, как в них начало действовать электричество, а вернее, союз электричества и магнетизма. Именно этот союз, открытый в простейших экспериментах с проволочками и магнитными стрелками, породил столь удобное, простое и чрезвычайно неприхотливое устройство, как электромотор, или, более официально, электрический двигатель. И именно электромагнитный союз дал человеку простой и очень эффективный способ получения электрической энергии.

Т-100. Всё многообразие электродвигателей, все их неисчислимые количества берут начало с открытия, сделанного примерно 200 лет назад. До сих пор мы знали, что ток, работая в электрической цепи, может создавать тепло и свет,

может переносить некоторые вещества с одного электрода на другой. Тепло, конечно, очень нужно, особенно зимой, свет — это всегда прекрасно. Но всё же человек на протяжении всей своей истории искал помощников, которые могли бы поднимать, перевозить, проталкивать, протягивать, передвигать, сжимать, вращать различные предметы, могли бы, коротко говоря, выполнять механическую работу.

То, что электричество могло бы это делать, подсказали уже первые опыты с натёртой янтарной палочкой. Но интуитивно чувствуется, что большой работающей силы здесь не получишь, — электричество притягивает какие-то клочки бумаги, да и то с близкого расстояния. Другое дело магнит или электромагнит, подсказывает та же интуиция, — он килограммовую гирю тянет вверх и, притянув, держит мёртвой хваткой, не оторвёшь. А маленькая катушка электромагнита в обычном реле, получив слабый импульс тока, так щёлкает притянутой стальной пластинкой, что, кажется, кто-то стукнул по ней молотком.

Интуиция в данном случае не подвела — главным электрическим работником действительно стал магнетизм, а точнее, союз электричества и магнетизма. Действует этот союз так: используя энергию электрогенератора (в простейшем случае батарейки), электрический ток с помощью электромагнитов создаёт магнитные поля, которые с большой силой взаимодействуют с магнитным полем другого электромагнита, неутомимо выполняя именно то, что требуется от исполнительного помощника, притягивают или отталкивают другой электромагнит.

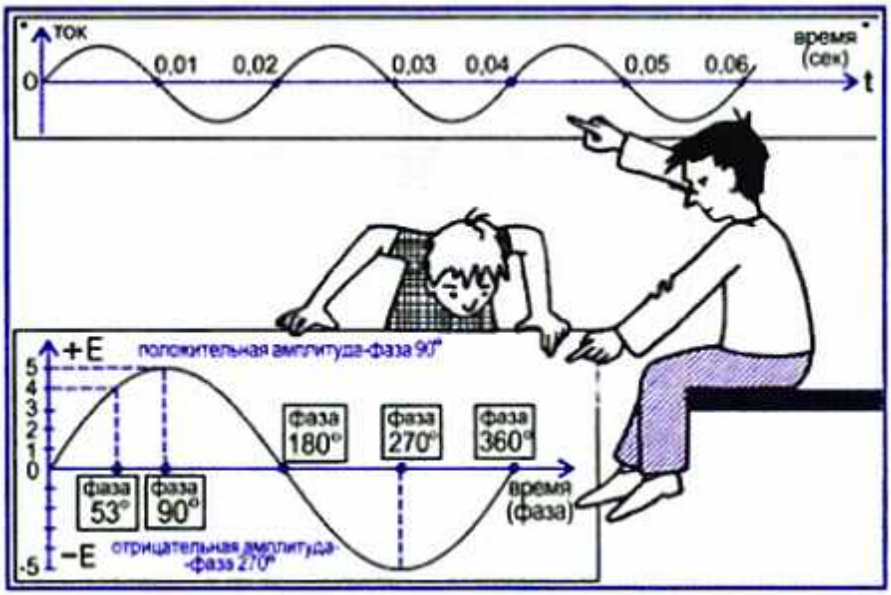


ВК-116. *Мы уже обратили внимание на то, что многие процессы зависят от скорости изменения какой-либо величины. Настало время посмотреть, как меняется скорость изменения*

синусоиды, — от скорости, как мы увидим, тоже многое зависит. Простейшие рассуждения и точный математический анализ показывают, что скорость изменения синусоиды это тоже синусоида, но опережающая основную зависимость на 90 градусов, — положительная амплитуда скорости появляется на 1/4 периода раньше.

Магнитные поля заставляют его двигаться, и при этом второй магнит поднимает, перевозит, проталкивает, протягивает, сжимает, передвигает, вращает, коротко говоря, выполняет механическую работу. Правда, подавляющее большинство этих электрическо-магнитных работников выполняют только одно из всех перечисленных действий — они создают крутящий момент на своей главной оси, быстро и с большой силой заставляют её вращаться. Имя этих исполнительных и неутомимых тружеников хорошо всем знакомо — это электрические двигатели, или, иначе, электрические моторы, что, по сути дела, одно и то же, так как «мотор» в переводе с латыни как раз и означает «создающий движение, двигатель». Ну а то, что электродвигатель создаёт лишь вращательное движение, не умаляет его достоинств. Во-первых, именно это и нужно для большинства наших машин-помощников — электропоездов, пылесосов, видеомагнитофонов, токарных станков и многих других. Ну и, во-вторых, механика умеет превращать вращательное движение в любое другое.

Даже представить себе трудно, что лабораторный опыт, который можно считать началом истории электродвигателей, был проведён примерно 200 лет назад, а первые настоящие, работающие моторы появились еще лет через 50. Электродвигатели, как, впрочем, почти вся техника нашего века, прогрессировали лавинообразно, причём и качественно, и количественно. Сегодня их наверняка тысячи разновидностей, а общее количество — миллиарды. Только в своём доме вы насчитаете не меньше десятка электромоторов: в компрессоре холодильника, вентиляторе, магнитофоне, в нескольких электронных часах, пылесосе, микроволновке, в компьютере и принтере. А ведь есть ещё трамваи, лифты, электродрели, самолёты, подъёмные краны, пожарные насосы, аппараты «искусственное сердце — лёгкие», стартеры и стеклоочистители в автомобилях — всего не перечислишь. И всё это началось с простейшего опыта, который, возможно, не специально был задуман, а получился случайно.



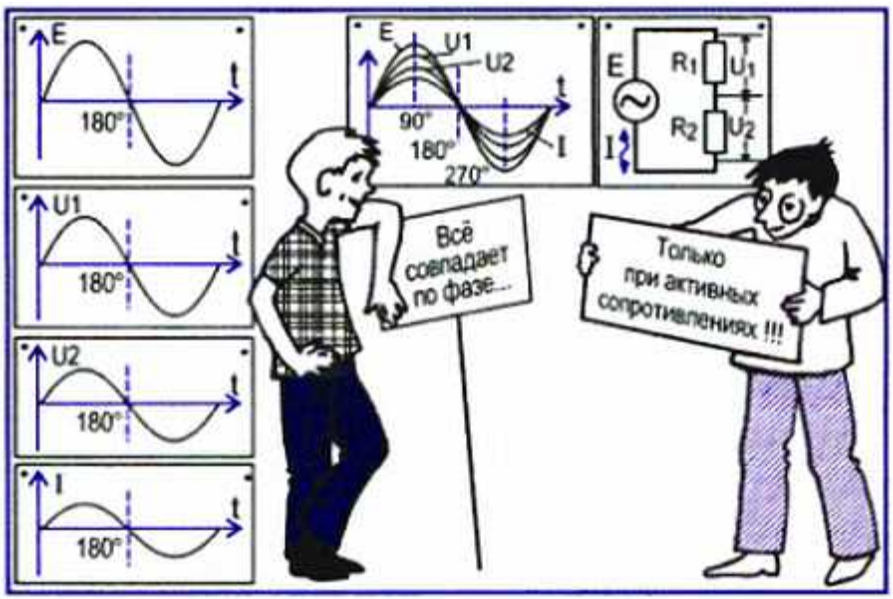
ВК-117. *Ещё один термин — «фаза», к которому вы быстро привыкнете. Это время появления определённого напряжения или тока. Например, положительной амплитуде э.д.с., наведённой в проводнике, соответствует фаза (момент) 90 градусов, а отрицательной амплитуде (наибольший ток противоположного направления) соответствует фаза (момент) 270 градусов. Термин «фаза» окажется очень удобным, когда в одной цепи появятся два тока и нужно будет найти разницу времени их появления — сдвиг фаз.*

Датский профессор Ганс Христиан Эрстед демонстрировал своим студентам, как электрический ток нагревает проволоку. При этом обнаружилось, что с появлением тока в цепи один из соединительных проводов, проходивший рядом с оказавшимся на столе морским компасом, отклоняет его стрелку. Это означало то, что вокруг проводника с током возникает магнитное поле.

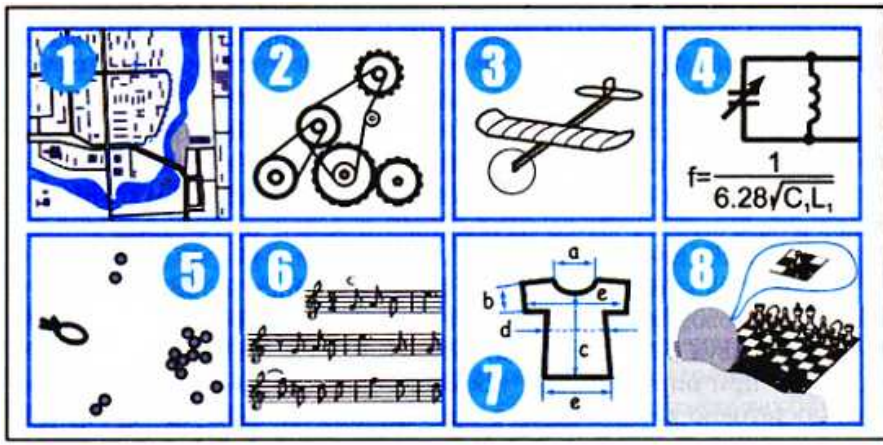
В дальнейшем исследователи в разных странах детально изучили поведение проводника с током в магнитном поле. Всё свелось к взаимодействию двух магнитов, в результате чего один из них — проводник с током — при определённых условиях (достаточно сильное внешнее поле, достаточно сильный ток в проводнике) начинал двигаться. Это движение и есть именно то, что требуется в двигателе: если бы к проводнику с током привязать какой-нибудь груз, то проводник вполне мог бы потащить его за собой. А энергия на эту работу шла бы от батареи, которая создаёт ток в проводнике и таким образом

превращает его в электромагнит.

Кстати, в реальном двигателе работает не единичный проводник с током, а целая проводниковая система, по которой идёт ток, называется она обмоткой. Да и внешнее поле чаще всего создаётся не постоянным магнитом, а электромагнитами, имеющими свои собственные обмотки. Поскольку в реальном двигателе происходит вращательное движение работающей, то есть двигающейся, обмотки, то весь узел, где находится эта обмотка, называется ротором, от латинского слова «ротаре» — «вращать». А вся неподвижная система с электромагнитом и стальным магнитопроводом называется статором, от латинского «статос» — «стоящий».



ВК-118. *В цепи переменного тока, которая состоит из обычных резисторов, все напряжения, все токи и э.д.с. совпадают по фазе — их положительные амплитуды, например, появляются одновременно, так же как и отрицательные. Элементы цепи, где совпадают по фазе токи и напряжения, — это активные сопротивления, они ведут себя активно, потребляют электрическую мощность. Совсем иначе ведут себя реактивные сопротивления, которые вскоре появятся в наших электрических цепях.*



Р-42. СЛОВО № 1 — «МОДЕЛЬ». Этим рисунком призываю вас по-новому подумать о том, что было рассказано, и о том, что будет. Как ни странно, но слова «модель» и «моделирование» почти не встречаются в школьных учебниках, за многие годы обучения наша смена не приобщается к скрытому за этими словами огромному богатству. Может быть, это связано с ограниченным пониманием слова «модель», которое поддерживают словари и справочники: модель — уменьшенная копия чего-либо (например, коллекция автомобильчиков), марка конструкции (трактор, модель МТЗ-82), человек, позирующий художнику, изделие, с которого снимают форму, и тому подобное.

Вместе с тем в науке и в жизни слово модель понимается прежде всего как упрощённое отображение какой-то сложности, помогающее понять эту сложность, изучить её или принять какое-то связанное с ней важное практическое решение. На рисунке (1) вы видите план небольшого города на берегу реки. Город — это прежде всего люди, их работа, характеры, личные отношения, это состояние домов, электрической сети, водопровода. Но нас всё это сейчас не интересует, нам нужно найти определённый дом и подъехать к нему.

Поэтому мы выбрали очень упрощённую модель города — его план, и на нём проложили свой маршрут. Точно так же мы оставили без внимания подробности устройства сложной машины и на её упрощённой модели-схеме (2) рассматриваем лишь передачу движения от одного блока машины к другому. Простейшая модель самолёта (3) помогает понять, как

форма, размеры и наклон крыла влияют на лётные качества большого авиалайнера. Модель входной цепи радиоприёмника (4) поясняет, как происходит его настройка на нужную станцию, а математическая модель (формула) позволяет определить необходимые для этого детали схемы. Модель может пояснить движение бактерии к месту скопления пищи (5), создание музыки (6), создание одежды разных размеров по отработанной модели (7). И, наконец, последний рисунок (8) напоминает, что, когда человек о чём-то мыслит, в его мозгу каким-то образом строятся модели различных устройств, взаимодействий, жизненных ситуаций. Процесс мышления в том и состоит, что человек работает с этими моделями, открывает законы, действующие в природе, постепенно создаёт свою картину мира, находит с помощью моделей варианты своих правильных действий.

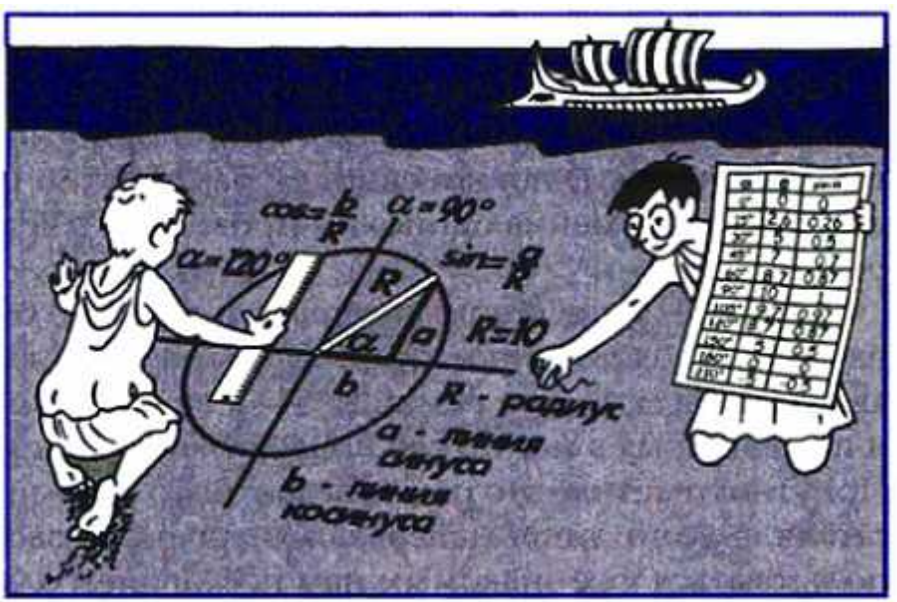
Двигатели бывают самые разные, разные по устройству, размерам, по режиму работы, потребляемой электрической мощности, разные по характеру питающей их электродвижущей силы. К некоторым двигателям нужно подводить неизменную э.д.с. (её обычно называют «постоянная э.д.с.», и мы принимаем это название). К другим обязательно нужна переменная питающая э.д.с., то есть такая, у которой непрерывно меняются величина и направление. Но во всех этих разных электрических двигателях используется один и тот же принцип: по обмотке ротора тем или иным способом пропускают ток; магнитное поле внешнего неподвижного, то есть статорного, магнита (или электромагнита) двигает роторную обмотку (и, разумеется, весь ротор), взаимодействуя с её собственным магнитным полем. Сила этого взаимодействия, а значит, и работоспособность двигателя, зависит от тока I в роторной обмотке и от индукции B внешнего магнитного поля: чем больше ток I в обмотке и чем больше индукция B внешнего поля, тем мощнее двигатель. Поэтому, между прочим, в двигателях так много стальных деталей — они уменьшают магнитное сопротивление, при этом возрастают магнитные потоки и магнитная индукция.

Т-101. **Правило левой руки позволяет узнать, куда движется проводник с током, помещённый в магнитное поле.** Пояснив в самом общем виде, как работает электрический двигатель, уже можно рассказать о нём кое-что конкретное.

Первое. Магнитное поле выталкивает проводник с током, и

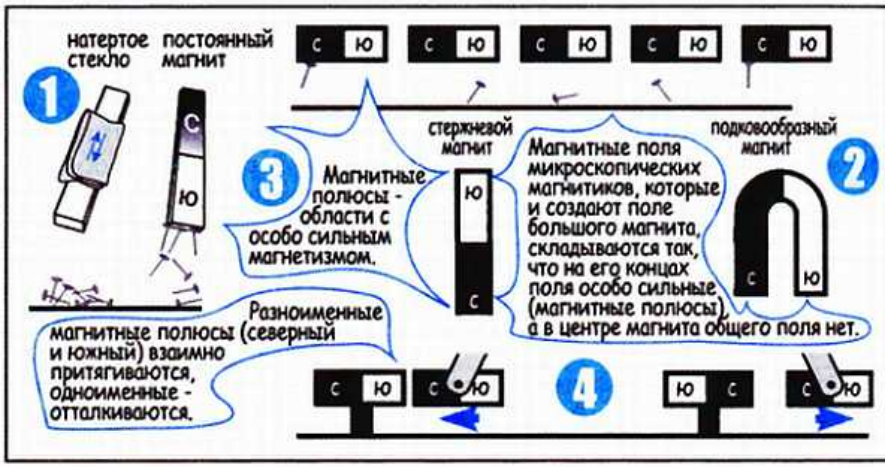
направление выталкивания можно определить по правилу левой руки (Р-50). Если расположить левую руку так, чтобы ладонь смотрела в сторону северного полюса внешнего магнита, а вытянутые пальцы были направлены в ту же сторону, что и ток в проводнике (не забудьте, это условное направление тока, от плюса к минусу), то отогнутый большой палец покажет, в какую сторону будет двигаться сам проводник с током.

Второе. Подводя итог рассказанному ранее, можно в виде простенькой формулы записать, что сила *F*, с которой внешнее магнитное поле двигает проводник, будет тем больше, чем больше длина проводника, чем больше ток в нём и чем выше магнитная индукция *B*, созданная внешним магнитом в районе проводника. Скромная длина проводника *I* влияет на силу *F* наравне с главными электрическими и магнитными параметрами, поэтому желательно поместить в магнитное поле насколько это возможно длинный проводник. Именно так и поступают, но, конечно, не раздувая до неприличия размеры двигателя, а заменив одинокий проводник многовитковой обмоткой ротора.



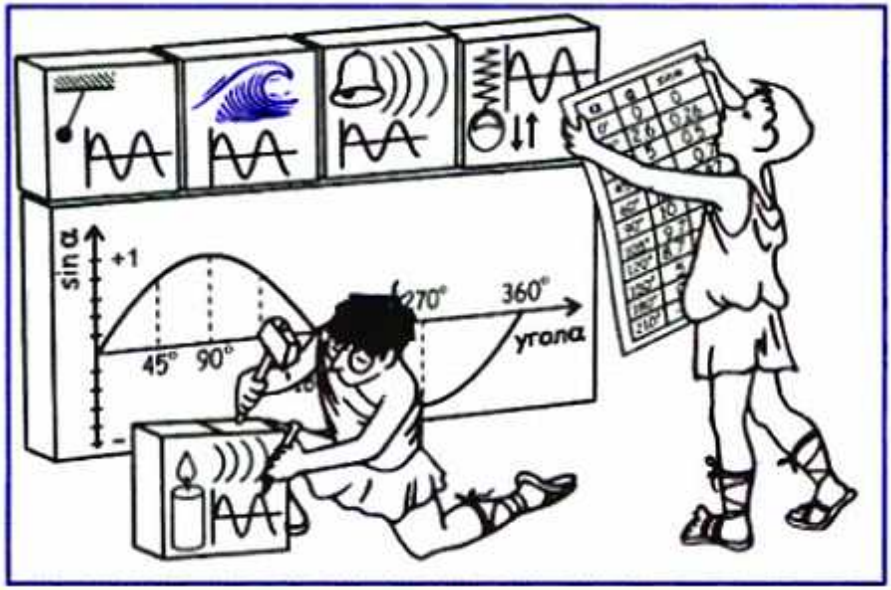
ВК-119. *Переменный ток (напряжение, э.д.с.), о котором в основном шла речь, — это синусоидальный ток, его изменения повторяют график, открытый древними математиками. Из точки пересечения двух осей, как из центра, была построена окружность, из точки, где с ней пересекался радиус* ***R****, провели две особые линии — линию синуса* ***a*** *и линию косинуса* ***Ь****. Вращая радиус* ***R****, записывали длину линий* ***a*** *и* ***Ь*** *для разных углов* ***α*** *— получилась*

таблица, по которой построили график и назвали его «синусоида».

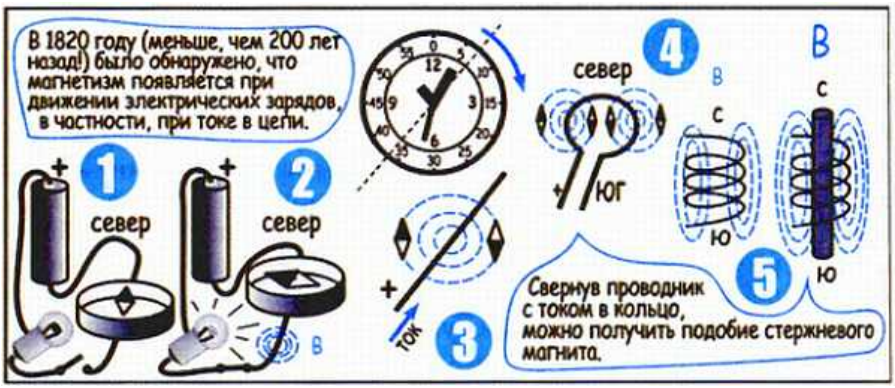

натертое стекло
постоянный магнит
С Ю
1
3
Магнитные полюсы - области с особо сильным магнетизмом.
стержневой магнит
Магнитные поля микроскопических магнитиков, которые и создают поле большого магнита, складываются так, что на его концах поля особо сильные (магнитные полюсы), а в центре магнита общего поля нет.
подковообразный магнит
2
Разноименные магнитные полюсы (северный и южный) взаимно притягиваются, одноименные - отталкиваются.
4

Р-43. В ПРОСТЕЙШИХ ОПЫТАХ МАГНИТ ДЕМОНСТРИРУЕТ СВОИ СИЛЫ И СВОЁ ПОВЕДЕНИЕ. Куски железной руды, притягивающие другие железные предметы, люди находили ещё несколько тысячелетий назад. И наверняка очень удивлялись своим находкам. До этого притягивание в природе встречалось только в одном экземпляре — наша планета Земля притягивала к себе все предметы, все вещества, демонстрируя то, что мы сейчас называем гравитационное притяжение. А тут какая-то земная порода, какая-то руда, в отличие от всех других веществ, своим притяжением копирует способность огромной планеты. Этой породе с удивительными притягивающими силами ещё в древности дали имя магнит, но лишь триста лет назад начали серьезно её изучать. А к пониманию природы магнитных явлений пришли совсем уже недавно, начав лет сто назад. Сегодня выплавленные из этой породы (руды) железные магниты хорошо знакомы всем, часто их особенности впервые показывали удивлённой публике на школьных уроках. В нехитрых экспериментах можно увидеть, что внутри магнита складываются его магнитные силы, образуя два полюса и практически немагнитную среднюю область магнита (2, 3). Опыты позволяют увидеть, как взаимодействуют два полюса магнита, получившие названия «северный» и «южный» (4).

Третье. Но тут возникает новая проблема, она лучше всего видна на примере самой простой роторной обмотки, состоящей из одного витка, — на примере рамки (Р-51) в виде соединённых друг с другом и помещённых в магнитное поле двух горизонтальных проводов *a* и *b*. Попутно отметим, что рамка не какой-то особый элемент электродвигателя, а всего лишь маленькая хитрость, позволяющая дважды воспользоваться уже знакомым нам поведением одиночного проводника в магнитном поле. К дальнему концу этого проводника нужно подвести провод питания, и это делает проводник, идущий от «минуса» батареи. Но этот проводник можно не вести стороной, а поместить его в магнитное поле, чтобы поле и его выталкивало в нужную сторону. Так появляется рамка, оба горизонтальных проводника которой поле выталкивает именно так, чтобы рамка вращалась. А поскольку она вращается (в этом весь смысл двигателя), питающее напряжение к ней подводится через скользящие контакты и два металлических кольца, к которым эти контакты прижаты. Давайте рассматривать процесс с момента, показанного на рисунке Р-51. Проводник a (это тот, с которым мы поясняли правило левой руки на Р-50) выталкивается магнитным полем влево, то есть стремится вращать рамку против часовой стрелки. Проводник *b* (тот, который был просто соединительным проводом, подключающим проводник *a* к «минусу» батареи) выталкивается вправо, поскольку ток в нём идёт в противоположную сторону по сравнению с *a*. При этом проводник *b* тоже стремится вращать рамку против часовой стрелки. То есть пока всё в порядке, проводники *a* и *b* действуют согласованно, с удвоенной силой вращая рамку. Но давайте посмотрим на всё в конце первой половины оборота, когда рамка окажется в положении, показанном на Р-51.2. В этот момент направление сил, созданных внешним магнитным полем, уже не способствует вращению рамки против часовой стрелки, и, сделав свои первые полоборота, она остаётся неподвижной.



ВК-120. *Обнаруженная математиками табличная зависимость длины некоторых линий от угла поворота радиуса в определённом геометрическом построении даёт повод поразмышлять о том, что есть математика. Оказалось, что синусоида описывает немало процессов, которые как бы сами по себе происходят в природе. Если бы древние математики смогли заглянуть в наши дни, они были бы потрясены тем, что их синусоида точно описывает переменный ток, который создают тысячи мощных генераторов.*



Р-44. НАТЁРТАЯ СТЕКЛЯННАЯ ПАЛОЧКА, ЕСЛИ РАЗМАХИВАТЬ ЕЮ, СТАНОВИТСЯ МАГНИТОМ. Примерно двести лет назад было сделано открытие, которое в итоге привело к новому пониманию

взаимодействий электричества и магнетизма. Это новое понимание в результате серьёзных экспериментов стало основой будущей электроэнергетики. В итоге обогатив нас мощными электродвигателями и генераторами электрической энергии. Как стало вскоре понятно, сделанное открытие помогло прийти к выводу, что, так сказать, независимого магнита вообще не существует, магнитные свойства и, следовательно, магнитное поле появляются при движении, при перемещении электрического заряда. Первое, что было обнаружено, — это появление магнитного поля вокруг проводника, по которому идёт электрический ток, то есть движутся заряды (1, 2). Направление магнитного поля в этом случае определяется по правилу буравчика, или по правилу часов (3). Сделав из проводника с током виток (4) и собрав из нескольких последовательно соединённых витков катушку (5), можно получить электромагнит, который будет создавать такое же примерно магнитное поле, как и постоянный стержневой магнит (Р-43.3).

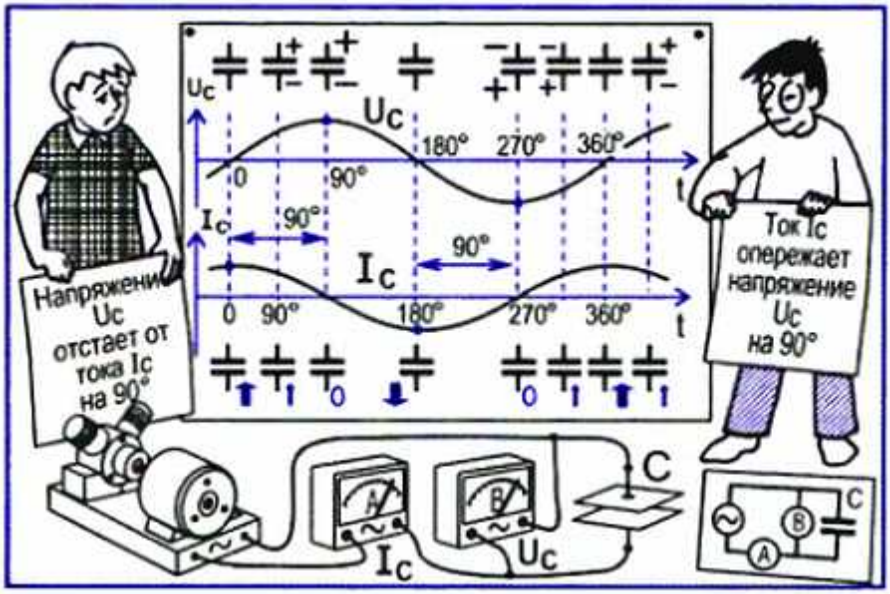
Четвёртое. Выход из этого, казалось бы, безвыходного положения очень прост. Если после завершения каждого полуоборота менять направление тока в проводах рамки, то силы магнитного выталкивания этих проводов каждые пол-оборота тоже будут менять своё направление и непрерывно будут вращать рамку в одну и ту же сторону. Для того чтобы направление тока автоматически менялось в нужный момент, достаточно произвести некоторое изменение в системе скользящих контактов. Они должны скользить не по двум окружностям, каждая из которых всегда связана с одним из проводов — *a* или *b*. Вместо двух колец в контактной системе теперь будут тоже связанные с этими проводами два полукольца, и скользящие по ним контакты, связанные с «плюсом» и «минусом» батареи, будут поочередно подключаться к этим полукольцам (Р-52). Именно поочередно — половину оборота «плюс» батареи подключён к одному полукольцу, а «минус» к другому; в следующую половину оборота полукольца, вращаясь вместе с рамкой, меняются местами, и к тому, которое получало «плюс», теперь подводится «минус». В итоге батарея будет направлять ток по проводам рамки то в одну сторону, то в другую, и согласно правилу левой руки провода *a* и *b* всегда будут выталкиваться магнитным полем так, чтобы рамка вращалась в одну сторону. Вся эта система

контактных полуколец называется «коллектор» (от латинского «коллект» — «собирать»), а скользящие по ним пружинящие контакты называют «щётками», чаще всего они сделаны из графита и прижаты к коллектору пружинами. Как правило, у двигателей в коллекторе не два полукольца, а 5-10 пар коллекторных пластин, к каждой паре подключена своя «рамка» — часть обмотки ротора. Включается эта часть обмотки своей парой коллекторных пластин на время, когда магнитная сила выталкивания вносит самый большой свой вклад во вращение ротора. Рисунок Р-52 помогает понять, как работает коллектор в случае самого простого ротора — одной рамки.

Пятое. Как всегда, нужно всеми силами повышать магнитную индукцию *B*, от которой напрямую зависит сила *F*, а значит, и работоспособность двигателя. Поэтому всю неподвижную часть мотора (статор) и его вращающийся узел (ротор) делают из стали, добиваясь минимально возможного зазора между этими двумя узлами двигателя. Для этого, например, в роторе делают пазы, в которые укладывают роторную обмотку, чтобы она не выступала за пределы стальной части и не вынуждала конструкторов увеличивать зазор между ротором и статором.

Шестое. На схемах двигатель имеет свое обозначение, но для простоты его чаще всего можно рассматривать как резистор. Потому что двигатель потребляет электрическую энергию и превращает её в механическую работу точно так же, как, скажем, лампочка эту энергию превращает в тепло и свет. Соответственно мощность *P* двигателя есть произведение подведённого напряжения *U* на потребляемый ток *I*, и точно так же, как для любого участка цепи, для двигателя действительны все формулы закона Ома.

Всё это предварительные сведения об электрических двигателях, о них ещё будет рассказано кое-что интересное и важное. А нам пора перейти к другим разновидностям замечательных электромагнитно-механических превращений, в том числе к таким, на которых основано крупномасштабное производство электрической энергии.



ВК-121. *Генератор переменной э.д.с. непрерывно меняет напряжение* U_c *на обкладках конденсатора* **C**. *При этом в них меняется число зарядов и появляется меняющийся ток* I_c — *движение зарядов к обкладкам и обратно. Ток этот тем больше, чем быстрее меняется напряжение* U_c, *а оно меняется быстрее всего, когда начинает нарастать от нуля или, уменьшаясь, приближается к нулю. В этот момент и появляется амплитуда тока, она опережает амплитуду напряжения на 90 градусов — на четверть периода.*

1
2
3
4
С
Ю
спин
У электрона, протона и нейтрона есть «личное» магнитное поле (магнетон Бора). Кроме того, заметное магнитное поле могли бы создать электроны, вращаясь вокруг ядра.
Структура ферромагнитных веществ - микроскопические области (домены) с явными магнитными свойствами. Внешнее поле формирует их направление и они усиливают это поле в сотни и тысячи раз (в μ раз).
Из старых учебников: в железе есть невидимые микромагнитики, они выстраиваются под действием внешнего поля и усиливают его.
Большинство веществ не создает внешних магнитных полей. В том числе потому, что в химических элементах в основном спаренные электроны, а их магнитные поля направлены одно против другого.
домены
внешнее магнитное поле

Р-45. ЗАГАДОЧНЫЕ «ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ МАГНИТИКИ»

ОКАЗАЛИСЬ РЕАЛЬНЫМ ФИЗИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ. Итак, магнетизм появляется как результат движения электрических зарядов, например как результат электрического тока в проводнике. Но откуда же тогда берутся магнитные свойства стальных постоянных магнитов, которые ни к какому электрическому генератору не подключены и ток в которых не протекает? В давние времена, когда о природе магнитных сил постоянных магнитов ещё ничего не было известно, появилась гипотеза о том, что в атомной или молекулярной структуре магнитного материала, например стали, имеются микроскопические подвижные «элементарные магнитики», которые обычно направлены в самые разные стороны, и их суммарное магнитное поле просто равно нулю. Если же намагнитить сталь, то есть поместить её в сильное магнитное поле, то оно повернёт «элементарные магнитики» в одну сторону, и в таком состоянии они останутся навсегда и у куска стали появится своё сильное магнитное поле, он превратится в постоянный магнит. В популярных книжках появились картинки таких колоний из «постоянных магнитиков», напоминающих микроскопические стрелки компаса. На одном из рисунков они были направлены в самые разные стороны, на другом у всех стрелок было одно направление. До сих пор широко публикуются различные варианты таких рисунков, хотя еще в 1911 году появилась и начала обсуждаться идея магнитных доменов, которые ведут себя подобно «элементарным магнитикам». Ну а в 1930 году домены были сфотографированы с помощью микроскопа, их реальность была окончательно доказана, они стали объектом глубоких физических исследований и новых проектов. Домен — это группа молекул, которая может иметь собственное магнитное поле. В намагниченной стали суммарные магнитные поля доменов направлены в одну сторону и создают намагниченность постоянного магнита.

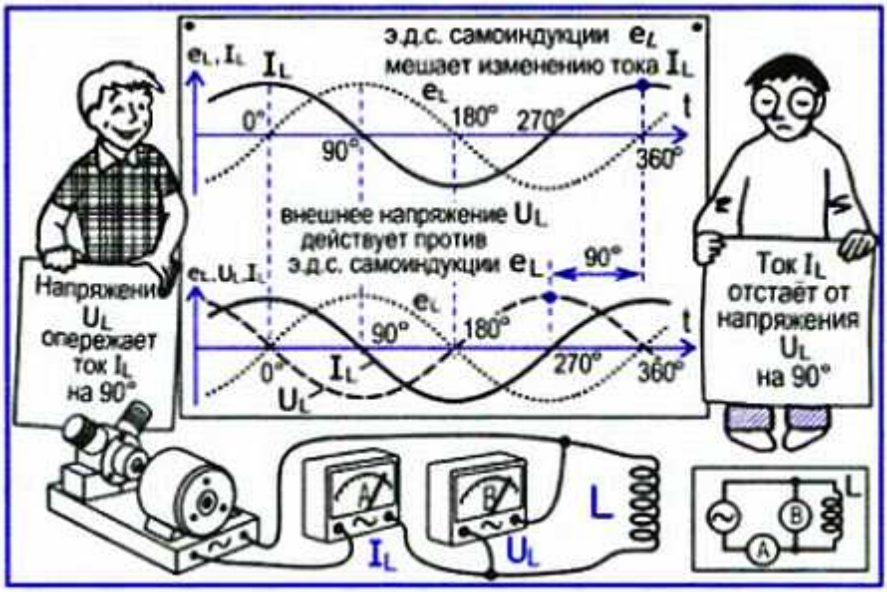
Т-102. **В проводнике, который движется в магнитном поле, индуцируется (наводится) электродвижущая сила.** После того как обнаружилось, что из электричества можно получать магнетизм, естественно было попытаться сделать обратное преобразование — из магнетизма получить

электричество. В природе известны подобные «туда-обратно» превращения — получают же, например, из воды лёд, а изо льда воду.

Электричество из магнетизма действительно было получено, но не сразу, а только через 11–12 лет после открытия Эрстеда. Все эти годы ушли на выяснение одной, как теперь кажется, очень простой истины.

Электричество с помощью магнита впервые получил английский физик Майкл Фарадей, обогативший мировую науку, в частности науку об электричестве, многими замечательными открытиями. Он, скорее всего, исходил из того, что электрический ток демонстрирует свои магнитные силы, если определённым образом расположить возле проводника с током магнитную стрелку. Возможно, поэтому Фарадей пытался самыми разными способами расположить проводник возле магнита, полагая, видимо, что ток сам собой появится в проводнике, если придать ему удачную форму и найти ему удачное место в магнитном поле.

Только спустя много лет, может быть, тоже случайно, Фарадей, обнаружил, что для получения тока в проводнике кроме этого проводника и магнита нужно ещё одно обязательное слагаемое — движение. Электродвижущая сила на концах проводника, а при замкнутой цепи и ток в нём, появляется лишь в том случае, если проводник определённым образом двигать в магнитном поле (Р-54). Или (что практически то же самое) определённым образом перемещать магнитное поле, в котором находится проводник. Такой способ получения э.д.с. называется электромагнитной индукцией, или в переводе — электромагнитным наведением. Имеется в виду, что движущееся или меняющееся магнитное поле индуцирует, то есть наводит, э.д.с. (ток) в проводе. А сама огромная область науки об электричестве, где сходятся электричество, магнетизм, изменение их параметров и механическое движение, называется «электродинамика».



ВК-122. *Сложнее картина в цепи с катушкой **L**. В цепи идет ток I_L и создаёт э.д.с. самоиндукции E_L, эта противоэ.д.с. всегда направлена против изменений тока. Поэтому нужно, чтобы напряжение генератора U_L всегда подавляло E_L, то есть было бы ей противофазно. При этом окажется, что ток I_L отстаёт по фазе от U_L на 90 градусов. То, что наблюдалось в цепях с **L** и **C**, никак не нарушает закон Ома — здесь происходят совсем другие события, которые и приводят к сдвигу фаз между током и напряжением.*

μ Коэффициент "магнитная проницаемость μ" оценивает взаимодействие разных веществ с внешним магнитным полем

диамагнетики - незначительно ослабляют поле
парамагнетики - незначительно усиливают поле
ферромагнетики - усиливают поле в сотни и тысячи раз

Таблица 1. ПАРАМАГНЕТИКИ		Таблица 2. ДИАМАГНЕТИКИ	
Воздух	1,000 000 36	Графит	0,999895
Алюминий	1,000 023	Ртуть	0, 999975
Марганец	1,0037	Медь	0,999991

Таблица 3. ФЕРРАМАГНЕТИКИ			
Кобальт	174	Железо отожженное	7000
Чугун	240 - 620	Трансформаторная сталь	7500
Никель	1120	Пермаллой С	60 000

Р-46. ВЕЩЕСТВА, ПРАКТИЧЕСКИ БЕЗДЕЙСТВУЮЩИЕ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ, И

ВЕЩЕСТВА, ДЕЙСТВУЮЩИЕ ОЧЕНЬ АКТИВНО. По своему поведению во внешнем магнитном поле и способности создавать своё собственное поле все вещества делятся на три группы: диамагнетики чуть-чуть (на доли процента) ослабляют внешнее поле; парамагнетики чуть-чуть усиливают его, а ферромагнетики за счёт перестройки своих доменов собственным магнитным полем усиливают поле внешнего магнита в сотни и тысячи раз. Эти свойства различных веществ отображаются их коэффициентом магнитной проницаемости **μ** и широко используются в электротехнике.

Появление индуцированной, наведённой э.д.с. в самом упрощённом виде (может быть, даже в недопустимо упрощённом) можно объяснить так. Каждый свободный электрон обладает магнитными свойствами, скорее всего за счёт каких-то внутренних сложных движений его электрического заряда. Поместим проводник во внешнее магнитное поле, и оно схватит (Т-8) свободные электроны проводника, взаимодействуя с ними, как с микроскопическими магнитиками. Если теперь двинуть проводник, то свободные электроны как бы останутся на месте, удерживаемые внешним полем, то есть получится, что проводник как бы сместится относительно своих свободных электронов. Но об этом можно сказать и иначе: свободные электроны сместились внутри проводника. В результате этого смещения на одном конце проводника концентрация электронов увеличилась, на другом — уменьшилась, то есть на концах проводника появилась электродвижущая сила. Если же остановить проводник, то электроны довольно быстро вернутся в свои старые районы и вновь равномерно распределятся в проводнике. При этом, разумеется, наведённая ранее э.д.с. на его концах исчезнет.

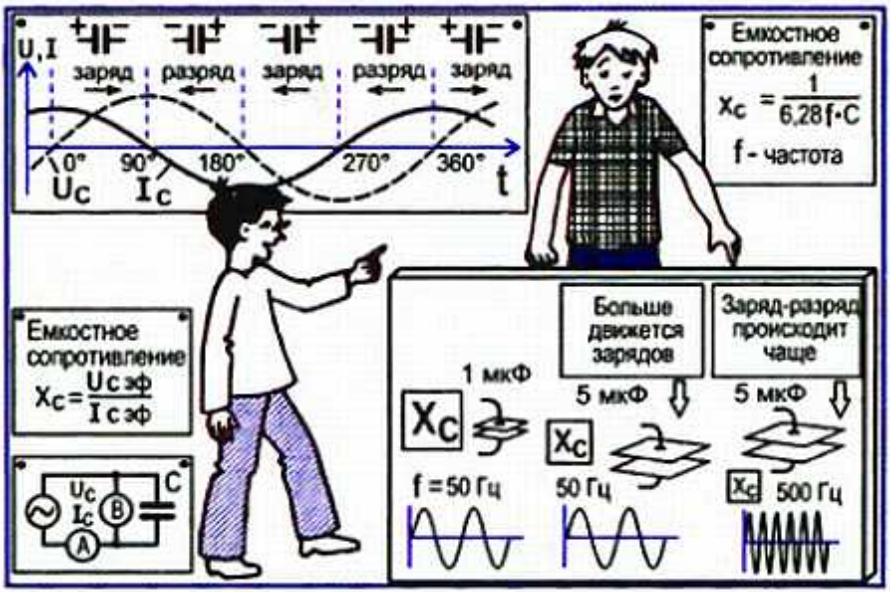
Ещё раз отметим, это очень упрощённое объяснение, скорее, даже намёк на объяснение, чем истинная картина. Но факт остаётся фактом: при движении проводника в магнитном поле или, что то же самое, при движении магнитного поля относительно проводника, в этом проводнике наводится электродвижущая сила. И называется этот процесс — «электромагнитная индукция».

Т-103. **Правило правой руки указывает направление э.д.с. и тока, которые появятся у проводника, если его двигать в магнитном поле.** Итак, при движении проводника в магнитном поле в нём (в проводнике) наводится электродвижущая сила E —

на одном конце проводника появляется «плюс», на другом «минус». Если к этому проводнику подключить какую-либо нагрузку, то наведённая э.д.с. создаст в ней ток. О том, где именно, то есть на каком конце проводника, появится «плюс», а где «минус», говорит правило правой руки: если ладонь помещена в магнитное поле так, что смотрит на северный полюс внешнего магнита, а отогнутый большой палец указывает, в какую сторону мы двигаем проводник, то вытянутые четыре пальца правой руки дают направление электродвижущей силы E от «плюса» к «минусу» (Р-55).

Движущийся в магнитном поле проводник — это фактически генератор, и, ещё раз отметим, если к нему подключить замкнутую внешнюю цепь, то в ней пойдёт ток с условным направлением от «плюса» к «минусу».

Как видите, правила правой и левой руки в чём-то похожи. В обоих случаях ладонь обращена к северному полюсу магнита, большой палец в обоих случаях указывает направление перемещения проводника, а вытянутые четыре пальца — направление тока. Из-за этой похожести иногда возникает путаница: там, где нужно воспользоваться правилом правой руки, применяют правило левой руки, и наоборот. Можно предложить простой мнемонический приём (от греческого слова «мнемоникон» — «искусство запоминания»), который поможет избежать этой ошибки. Представьте себе, что оба правила открыл левша, у которого левая рука ловче и сильнее правой. Открыл он эти правила и обрадовался — оказалось, что, оценивая силу F выталкивания проводника из магнитного поля, нужно применять правило сильной левой руки. «При магнитном выталкивании проводника вся сила в левой» — гордо сообщил левша своим ученикам, и они уже никогда не ошибались в выборе правила.

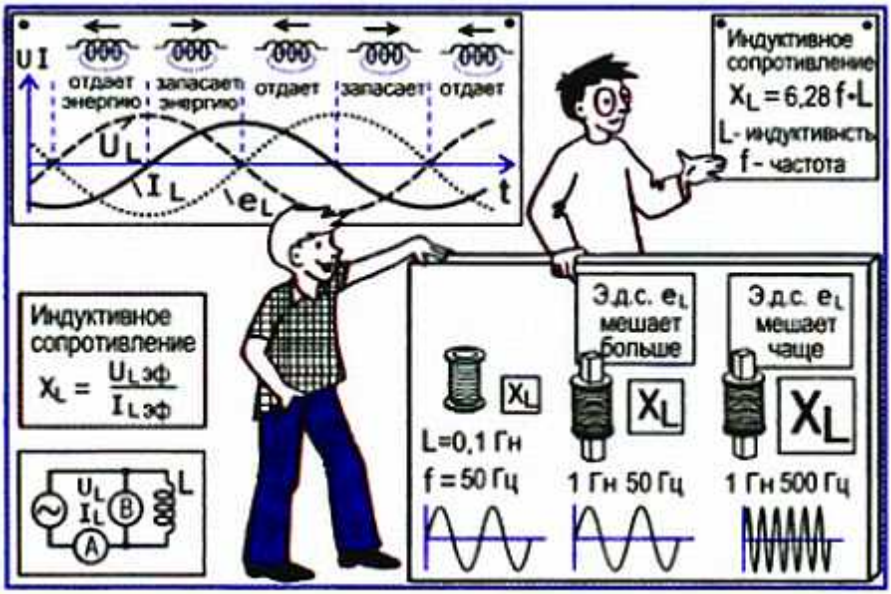


ВК-123. *Под действием переменного напряжения происходит непрерывный заряд-разряд конденсатора, в его цепи идёт переменный ток. Поэтому конденсатор можно рассматривать как некое ёмкостное сопротивление* X_C *и применить для данного участка цепи закон Ома. Сопротивление* X_C *тем меньше, чем больше ёмкость* C*, то есть чем больше зарядов идёт на обкладки или уходит с них. Сопротивление* X_C *падает также с увеличением частоты — при этом больше зарядов движется в цепи за секунду.*

Т-104. **Чем быстрее проводник пересекает магнитное поле, тем больше э.д.с., наведённая в этом проводнике.** Величина э.д.с. *E*, наведённой в генераторе (пока его роль у нас выполняет движущийся в магнитном поле проводник), зависит от индукции B внешнего магнитного поля и от длины проводника, в котором эта э.д.с. наводится. Ну и, конечно, величина наведённой э.д.с. зависит от скорости, с которой мы перемещаем проводник в магнитном поле. Или, точнее говоря, э.д.с. зависит от скорости, с которой проводник движется поперёк магнитного поля, пересекает это поле.

Обратите внимание на разницу определений «Проводник движется в магнитном поле» и «Проводник пересекает магнитное поле». Дело в том, что электродвижущую силу наводит не любое движение проводника, не его перемещение куда угодно, а движение именно поперёк поля, перпендикулярно условным магнитным линиям, соединяющим северный полюс внешнего магнита с южным. Если двигать проводник вдоль этих линий, то в

нём э.д.с. вообще не наведётся, если двигать проводник под углом, то величина наведённой э.д.с. определится не общей скоростью, а лишь той её составляющей, которая пересекает поле.



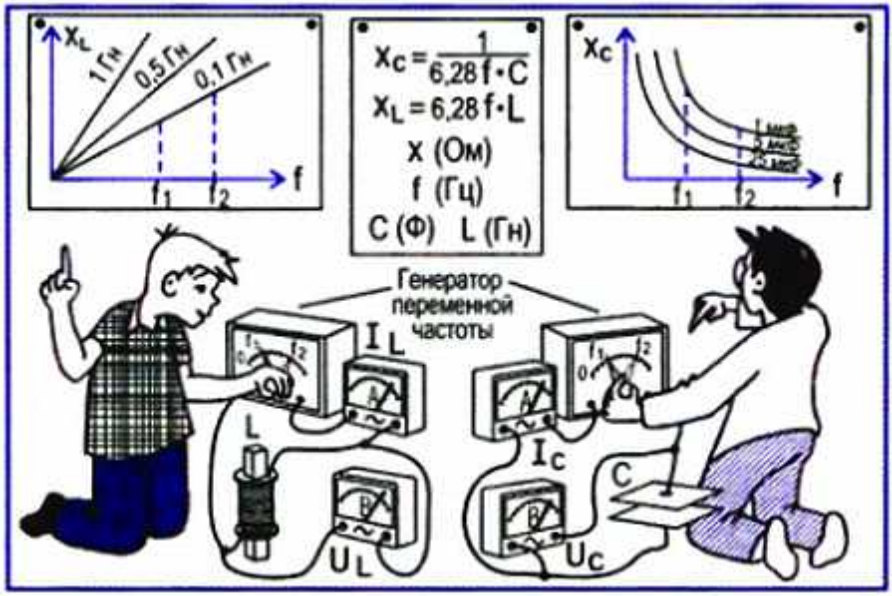
ВК-124. *Под действием переменного напряжения в катушке идёт переменный ток, и поэтому её представляют индуктивным сопротивление* X_L. *Оно растёт с увеличением индуктивности* **L** *и частоты* **f**. *Соотношение между током, напряжением на катушке и её индуктивным сопротивлением определяет закон Ома. Катушка и конденсатор мощности не потребляют, за что они и названы реактивными сопротивлениями. Получив энергию в своё магнитное или электрическое поле, они туг же отдают её обратно.*

Структура магнитного поля такова, что когда проводник движется вдоль условных магнитных линий, соединяющих северный магнитный полюс с южным, то этот проводник всё время пребывает в неизменных магнитных условиях, и никакого изменения внешней магнитной обстановки он не ощущает (Т-8). А вот когда проводник пересекает магнитное поле, то он всё время как бы чувствует (Т-8) изменение поля, и именно это изменение приводит в итоге к индукции, к наведению э.д.с. Коротко говоря, электродвижущая сила наводится в проводнике при изменении магнитного поля, в котором находится проводник. При этом кроме механического перемещения проводника есть другие возможности изменять окружающее его магнитное поле, и

все они приводят к наведению в проводнике электродвижущей силы.

Т-105. **Чтобы увеличить наведённую э.д.с. можно свернуть проводник в катушку или (и) быстрее менять магнитное поле.** Повторим еще раз: для того чтобы в проводнике навелась э.д.с., можно двигать его в магнитном поле или, что то же самое, магнитное поле двигать относительно проводника. Во всех случаях, чтобы увеличить наведённую электродвижущую силу *E*, достаточно увеличить длину проводника или просто использовать давно известную нам хитрость: вместо одиночного провода взять катушку с большим числом витков. Если рядом с этой катушкой быстро двигать магнит, то вольтметр, подключённый к ней, будет отклоняться весьма заметно, сообщая, что в катушке индуцировалась, то есть навелась, немалая э.д.с. Электродвижущая сила, наведённая в одном витке, скорее всего, невелика, но все витки, по сути дела, соединены последовательно, и все наведённые в них небольшие э.д.с. суммируются. Этим катушка напоминает батарею из последовательно соединённых гальванических элементов.

То, о чём шла речь до сих пор, — самая явная, самая наглядная разновидность индукции, магнитное поле просто перемещалось относительно проводника или катушки. Перед тем как переходить к другим способам наведения э.д.с., ещё раз напомним, что наведённая электродвижущая сила напрямую зависит от скорости движения магнитного поля. Это исключительно важная зависимость, причём зависимость общего характера, она наблюдается в огромном множестве физических процессов.

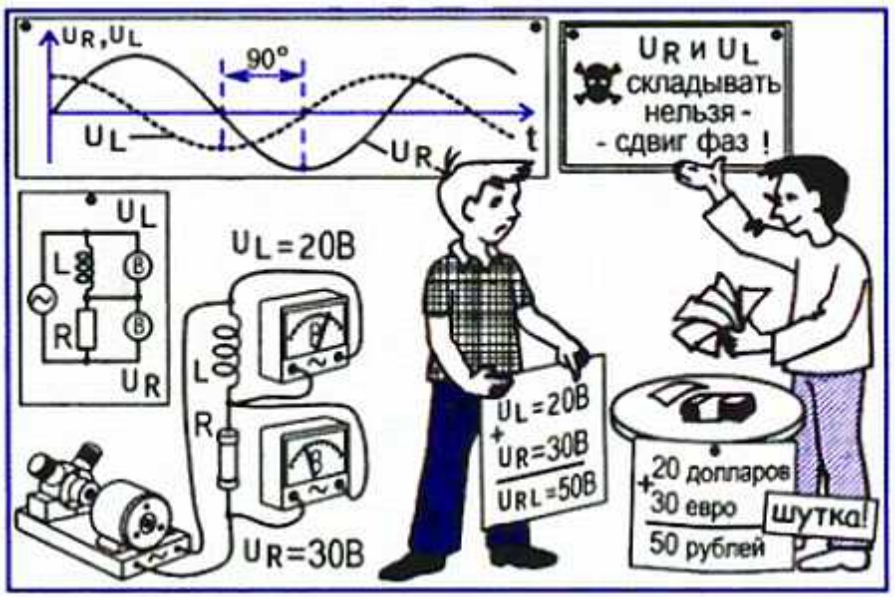


ВК-125. *Обратим особое внимание на то, как индуктивное сопротивление катушки и ёмкостное сопротивление конденсатора зависят от частоты. Зависимость эта разная — например, с увеличением частоты ёмкостное сопротивление становится меньше, а индуктивное растёт. Часто оба эти элемента помещают в общую электрическую цепь, для того чтобы конденсатор и катушка своей различной зависимостью сопротивления от частоты участвовали в подавлении каких-то частот или, наоборот, в подъёме их уровня.*

Т-106. **Во многих процессах решающую роль играет не само значение какой-либо величины, а скорость её изменения**. Вообразите себя героем арифметической задачи из популярной серии задач с бассейнами. По условиям нужно выбрать для купания один бассейн из трёх возможных. При этом известно, что в первом бассейне уровень воды 40 сантиметров, во втором — 5 сантиметров и в третьем воды вообще нет. Из всех этих водоёмов вы, конечно, выбираете первый — лучше уж войти в воду по колено, чем по щиколотку. Но вот, почитав условия задачи чуть дальше, вы узнали, что кран, наполняющий первый бассейн, закрыт, а во втором бассейне кран открыт (в задаче с бассейнами обязательно должны быть открытые и закрытые краны), и уровень воды поднимается на 3 сантиметра каждую минуту. Приходится на ходу менять решение — выбираем второй бассейн, через полчаса вода здесь поднимется до метровой отметки и можно будет поплавать по-настоящему.

В ожидании, пока это произойдёт, вы, наконец, дочитали условия задачи до конца и выяснили, что если полностью открыть кран в третьем бассейне, то уровень воды в нём каждую минуту будет подниматься на 15 сантиметров. Теперь сомнений нет — лучше всех третий бассейн, он наполнится до того же метрового уровня, что и второй, но уже не за полчаса, а всего за каких-нибудь 6–7 минут. Только успеешь раздеться, и уже можно нырять.

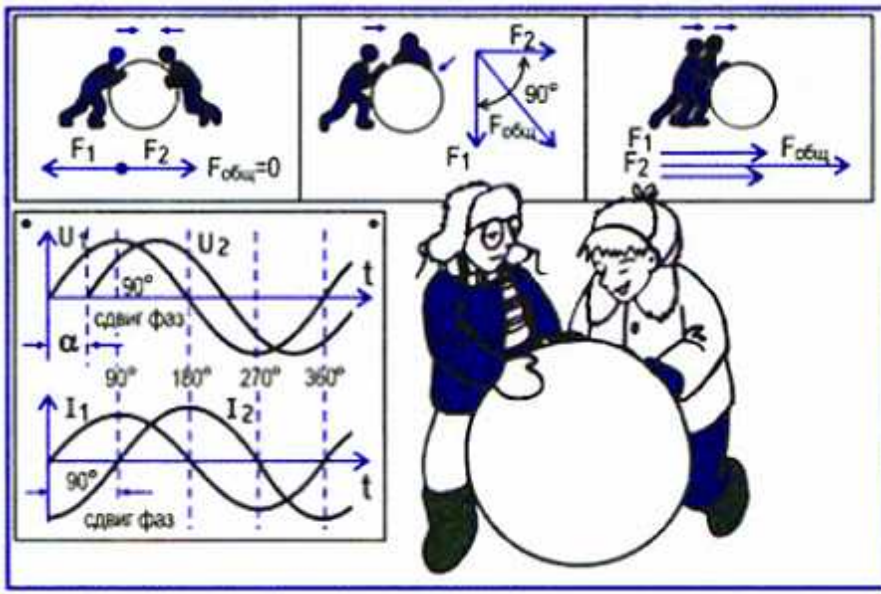
Этот простой пример показывает, что есть случаи, когда нужно не только спрашивать: «Сколько?», но стоит также поинтересоваться: «Меняется или не меняется?» Если окажется, что меняется, то необходимо выяснить: «С какой скоростью меняется?» Вы уже видели, что важный результат может в первую очередь зависеть от ответа на этот вопрос, то есть именно от скорости изменения какой-либо величины.



ВК-126. *Нельзя получить общее сопротивление, просто сложив сопротивления последовательно соединённых катушки* $\boldsymbol{X_L}$ *и резистора* $\boldsymbol{R}$. *Ток по этим сопротивлениям, как во всякой последовательной цепи, идёт одинаковый, но согласно расчётной формуле закона Ома сопротивление определяется током и напряжением (ВК-53). А напряжения на катушке и на резисторе сдвинуты по фазе на 90 градусов. Поэтому просто складывать сопротивления* $\boldsymbol{R}$ *и* $\boldsymbol{X_L}$ *недопустимо, если хочешь получить правильный результат.*

Т-107. **Разновидность электромагнитной индукции — взаимоиндукция**. Создать электродвижущую силу, навести её путем электромагнитной индукции можно ещё и так. Разместим катушку L_2 в магнитном поле электромагнита L_1 (Р-54.3). Он получает ток от батарейки Б, но не напрямую, а через переменное сопротивление R, через реостат. В самой же катушке L_2 нет источника энергии, и к ней подключён лишь вольтметр — в надежде на то, что в этой катушке будет наведена э.д.с. По обмотке электромагнита от батареи *Б* идёт постоянный ток, магнитное поле есть, а стрелка вольтметра, подключённого к L_2, пока не отклоняется — наведённой э.д.с. в этой катушке пока нет. И нетрудно объяснить почему — магнитное поле остаётся неизменным, постоянным, а чтобы навести в проводнике или в катушке электродвижущую силу, внешнее магнитное поле нужно менять. Мы, конечно, можем двигать электромагнит L_1 или двигать саму катушку L_2, но тогда мы просто вернёмся к предыдущим вариантам электромагнитной индукции (Р-54.1, Р-54.2) — к наведению э.д.с. за счёт перемещения проводника или катушки в магнитном поле или самого этого поля. Попробуем поступить иначе. Давайте повернём ручку переменного сопротивления R и таким способом изменим общее сопротивление цепи. В итоге изменится ток в катушке электромагнита L_1, а значит, изменится напряжённость магнитного поля H и вместе с ней магнитная индукция B в том районе, где находится катушка L_2, стрелка вольтметра отклонится, сообщая, что в катушке L_2 навелась электродвижущая сила.

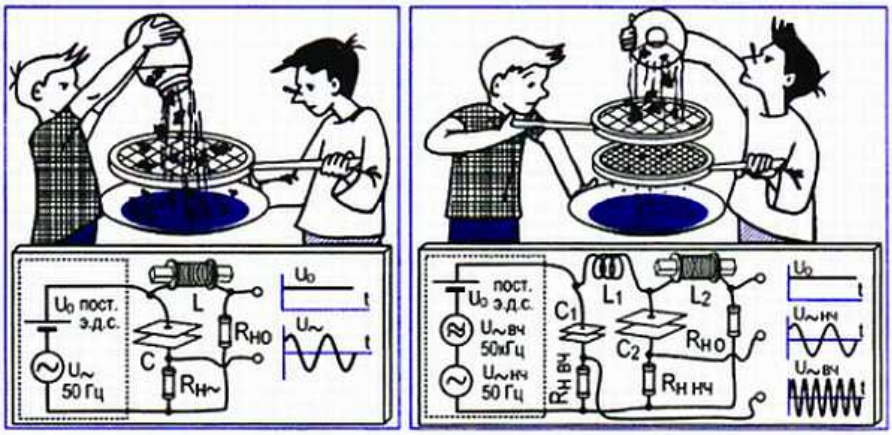
Представленная выше разновидность электромагнитной индукции называется взаимоиндукция — электродвижущая сила фактически наводится из одной электрической цепи в другую, но, как всегда, с участием меняющегося магнитного поля. Взаимоиндукция чаще всего используется для передачи энергии из одной катушки в другую в устройствах, именуемых трансформаторами (Р-76). Катушка L_1 (на схемах катушку принято обозначать той же буквой L, что и индуктивность катушки, то есть её способность создавать магнитное поле), где находится источник меняющегося тока, называется первичной обмоткой трансформатора, а катушка L_2, к которой подключена нагрузка $R_н$, называется вторичной обмоткой. Встречаться с трансформаторами мы будем довольно часто, эти очень простые по принципу действия электрические машины занимают очень важное место в электроэнергетике.



ВК-127. *Проблему складывания двух сопротивлений, из которых одно реактивное (**X_L** или **X_C**), поясняет знакомая зимняя сценка, где два приятеля пытаются сдвинуть большой снежный шар. Их усилия суммируются лишь в том случае, когда они толкают шар в одну сторону. Если в шутку они толкают его в разные стороны, то их усилия компенсируют друг друга, и шар стоит на месте. Если же между усилиями угол 90 градусов, то дело похоже на складывание **R** и **X_L** и задачу можно решить с помощью теоремы Пифагора.*

Т-108. **Ещё одна разновидность электромагнитной индукции — *самоиндукция*.** Отключим катушку L_2 и попробуем выяснить, что происходит в первичной обмотке, в катушке L_1 при изменении тока в ней (Р-55). Используя знания, полученные в предыдущих разделах, и дедуктивный метод Шерлока Холмса, приходим к выводу, что при изменении тока в катушке L_1 меняется её магнитное поле, и катушка сама в себе наводит электродвижущую силу. А почему бы нет? Магнитное поле меняется? Меняется. Оно охватывает витки самой катушки? Охватывает. А при изменении магнитного поля, охватывающего витки катушки, в ней наводится э.д.с. В данном случае она называется э.д.с. самоиндукции и, как и во всех предыдущих вариантах электромагнитной индукции, пропорциональна скорости изменения магнитного поля. Полярность наведённой э.д.с. (расположение «плюса» и «минуса» на выводах катушки) зависит от того, как именно, в каком направлении меняется

магнитное поле, но об этом чуть позже.



ВК-128. *Электрическая цепь, где конденсаторы, катушки и обычные активные сопротивления (резисторы) используют для разделения токов разных частот, называют фильтрами. Фильтры бывают очень простыми, например, из соединённых параллельно одного резистора (через него пойдёт постоянный ток) и одного конденсатора (через него замкнутся переменные токи, а постоянный, конечно, не пойдёт). А бывают фильтры сложные, многозвенные, выделяющие в том числе токи определённых частот.*

Глава 9
Краткая экскурсия по полям

Главный герой всего электрического королевства, главное действующее лицо всей окружающей нас многообразной электрической техники — это, конечно, электрический заряд, то есть особое качество материи, существующее как минимум с рождения Вселенной. Действует электрический заряд всегда через неизменно его окружающую невидимую физическую реальность по имени «поле» — у неподвижного электрического заряда всегда есть электрическое поле, у движущегося ещё и магнитное. Рассматривая многие процессы в электрических цепях, приборах или машинах, для упрощения картины довольно часто не думают об этих полях. Но есть случаи, когда без напоминания о поле ничего не объяснишь, и пусть в каком-то упрощённом виде, но оно обязательно присутствует в учебных моделях физических процессов и в описаниях технических устройств. О некоторых таких случаях уже шла речь, с другими ещё предстоит встретиться.

Т-109. **Индуктивность ^{L} катушки говорит о том, насколько эффективно она создаёт магнитное поле с помощью протекающего по ней тока.** Единица индуктивности — генри, Гн. Итак, катушка может работать в режиме самообслуживания. При изменениях тока, который проходит по катушке, она сама создаёт меняющееся магнитное поле, которое в этой же катушке наводит электродвижущую силу — э.д.с. самоиндукции. Ещё раз напомним, что э.д.с. самоиндукции, как и любая другая наведённая э.д.с., пропорциональна скорости изменения магнитного поля, а значит, скорости изменения тока в катушке.

Проиллюстрируем это наглядным примером. По двум совершенно одинаковым катушкам идёт ток — по первой не очень большой, 1 ампер, по второй — огромный, 1000 ампер. Токи в катушках постепенно меняются, и через секунду ток в первой катушке составляет 6 А, во второй — 1001 А. Несмотря на эту устрашающую абсолютную величину (1001 А — это очень много), э.д.с. самоиндукции во второй катушке будет меньше, чем в первой. Потому что при наведении э.д.с. важна не абсолютная величина, а скорость её изменения.

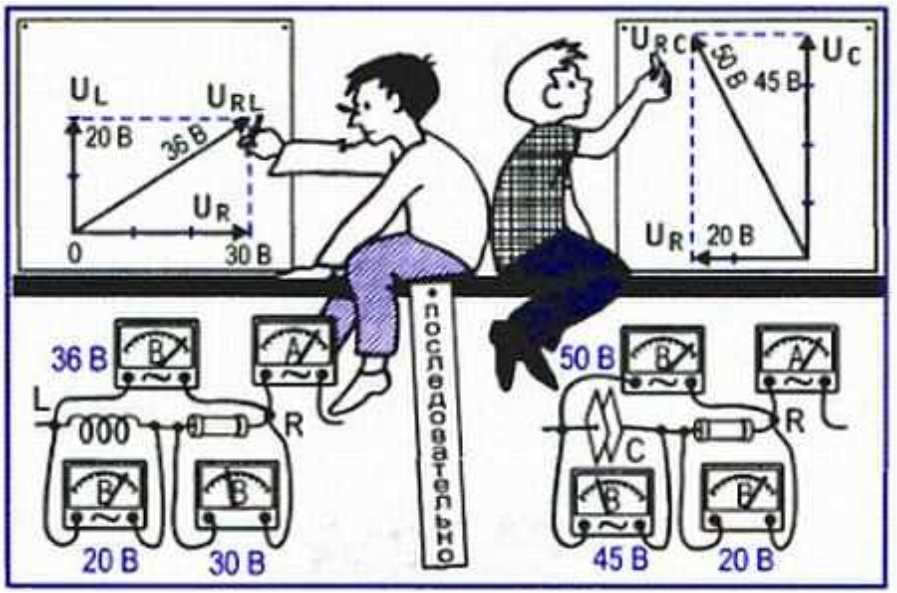
Скорость изменения тока в первой катушке больше — здесь

ток изменился на 5 ампер за 1 секунду, а во второй катушке — всего на 1 ампер за 1 секунду.

Величина э.д.с. самоиндукции зависит также и от самой катушки, от её способности создавать магнитное поле. Предположим, что по двум разным катушкам идёт одинаковый ток 5 А. При этом в первой катушке много витков, и ток 5 А создаёт в ней значительную магнитную индукцию B. Во второй катушке витков намного меньше, и такой же ток 5 А создаёт в ней значительно меньшую индукцию B. Давайте в обеих катушках за 1 секунду увеличим ток в 2 раза — магнитная индукция в районе катушек тоже увеличится в 2 раза. При этом в первой катушке скорость нарастания магнитной индукции будет значительно больше, чем во второй. И вывод: величина э.д.с. самоиндукции зависит не только от скорости изменения тока, но и от того, насколько эффективно катушка использует эти изменения. То есть от того, насколько эффективно она преобразует энергию меняющегося тока в энергию меняющегося машитного поля.

Об этих способностях катушки говорит её коэффициент самоиндукции, или, иначе, индуктивность, которая обозначается так же, как и сами катушки на схемах, буквой *L*. Единица индуктивности — генри, сокращённо Гн, она названа именем американского физика и инженера Джозефа Генри (1797–1878). Индуктивностью 1 генри обладает катушка, если при изменении в ней тока на 1 ампер за 1 секунду в катушке наводится электродвижущая сила самоиндукции в 1 вольт.

Т-110. **Катушка запасает энергию в своём магнитном поле**. Имея достаточно точные измерительные приборы, можно обнаружить странное, на первый взгляд, явление: если, замкнув выключатель, мгновенно подать напряжение на катушку, ток в катушке установится не сразу, он будет нарастать, может быть, и быстро, но постепенно (Р-62). И это объясняется так: при увеличении тока в катушке наводится э.д.с. самоиндукции, она направлена против растущего тока и притормаживает его нарастание. Когда ток достигнет своей нормальной, постоянной величины, он, естественно, перестанет расти, и при этом, конечно, исчезнет э.д.с. самоиндукции, которая только что противодействовала нарастанию тока.



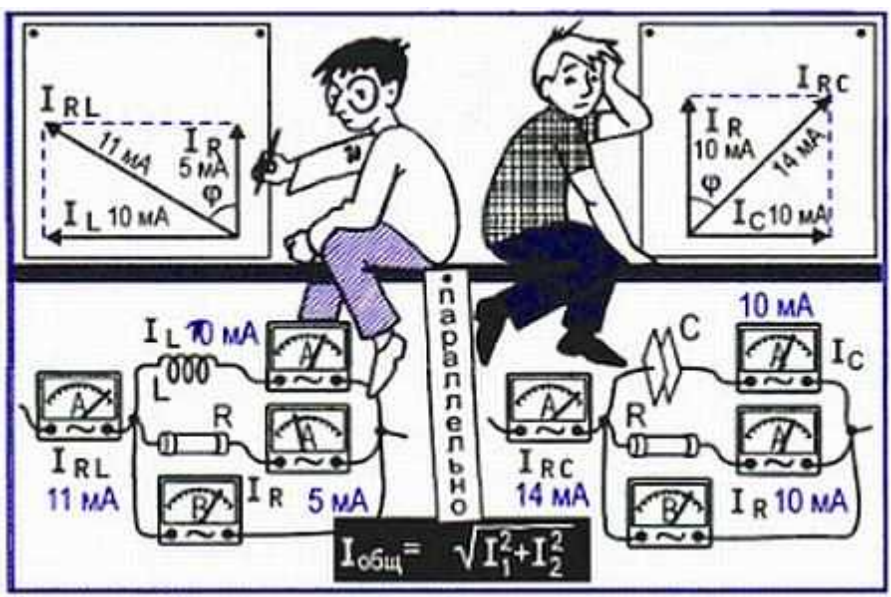
ВК-129. *При последовательном соединении катушки с резистором и конденсатора с резистором ток в каждой из этих двух цепей общий и величина его известна. Каждую пару напряжений можно сложить в простейшей геометрической фигуре и, пользуясь в итоге теоремой Пифагора, определить общее напряжение двух сдвинутых по фазе на 90 градусов напряжений, как гипотенузу прямоугольного треугольника. Задача этого и следующего рисунков (ВК-130) показать, что такое в принципе возможно.*

Похожая картина наблюдается и при выключении, при разрыве цепи — ток сразу, резко не прекращается, его какое-то мгновение поддерживает э.д.с. самоиндукции, в момент выключения она направлена в ту же сторону, что и э.д.с. батареи, и как может поддерживает убывающий ток. Электродвижущую силу самоиндукции из-за этих её действий часто называют противоэ.д.с., она всегда противодействует изменениям тока в цепи катушки — при нарастании тока препятствует этому нарастанию, при уменьшении тока препятствует уменьшению, замедляет, затягивает его, поддерживая ток.

Нарисованная картина не покажется странной, если вспомнить, что ток, проходя по катушке индуктивности, создаёт её магнитное поле. А в любом поле — гравитационном, электрическом, магнитном — всегда запасается энергия. На создание магнитного поля катушки, на создание в нём запасов энергии как раз и расходуется энергия батареи в момент

включения. Именно поэтому ток резко не нарастает, он в первое мгновение тратит часть своей энергии на создание энергетических запасов в магнитном поле. А при выключении эти запасы возвращаются в электрическую цепь, поддерживая ток вместо уже отключённой батареи.

Катушка запасает тем больше энергии, чем больше её индуктивность L и чем больше сила постоянного тока I, который по этой катушке проходит. С практической, так сказать, с хозяйственной точки зрения хранить энергию в магнитном поле катушки не очень удобно — нужно всё время пропускать по катушке ток, чтобы поддерживать её магнитное поле. В этом отношении конденсатор более удобная энергетическая кладовая, хотя катушка, как это бывает в спорте, может ещё выйти вперёд, оставив конденсатор далеко позади, если достоянием практической энергетики станет высокотемпературная сверхпроводимость.



ВК-130. *При параллельном соединении катушки с резистором и конденсатора с резистором на каждой из этих пар действует одинаковое для обоих элементов напряжение. Задача в этот раз сводится к тому, чтобы, измерив каждый из пары токов, сдвинутых по фазе на 90 градусов (токи в первом случае через катушку и резистор и во втором случае через конденсатор и резистор), найти общий ток, а затем и общее сопротивление. Общий ток находим в простейшем геометрическом построении, пользуясь идеей Пифагора.*

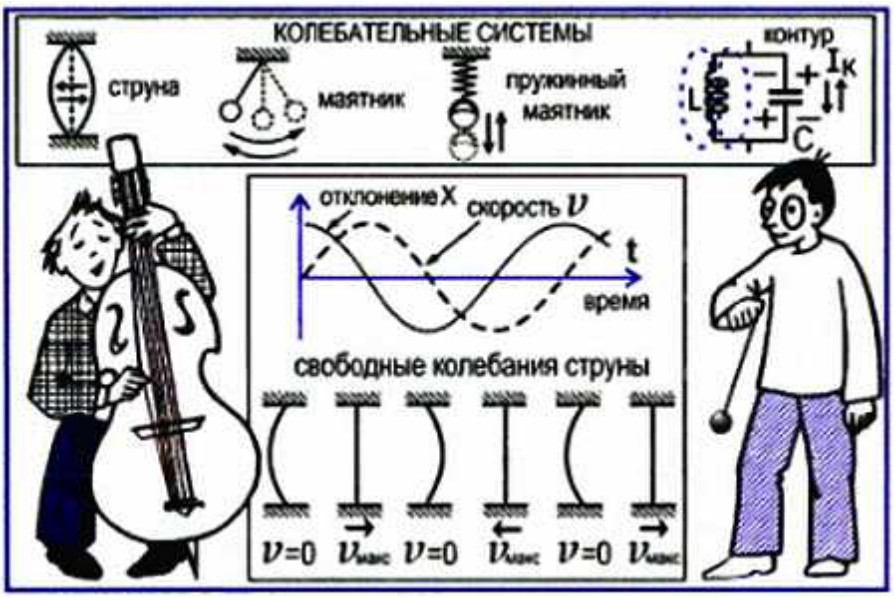
Т-111. **Конденсатор запасает энергию в своём электрическом поле**. Натирая в первых электрических опытах пластмассовую палочку, мы фактически тратили силы на то, чтобы создать запас энергии в её электрическом поле. Потом поле малыми порциями возвращало свои небольшие запасы, поднимая клочки бумаги. Практически любой предмет можно наэлектризовать и тем самым создать у него электрическое поле с каким-то запасом энергии. Но есть и специально предназначенное для этого устройство, которое как бы концентрирует, сгущает поле, и называется оно поэтому «конденсатор», от латинского слова «конденс» — «сгущать».

Если расположить одну над другой две металлические пластины и на короткое время подключить их к батарейке, то на пластины с электродов батареи перейдёт какое-то количество избыточных зарядов, и они будут оставаться там довольно долго. Такой пластинчатый накопитель зарядов как раз и называют конденсатором, на схемах его обозначают буковой С, поскольку это первая буква английского слова «капэситор» (capacitor) — «накопитель». Металлические пластины конденсатора называют его обкладками.

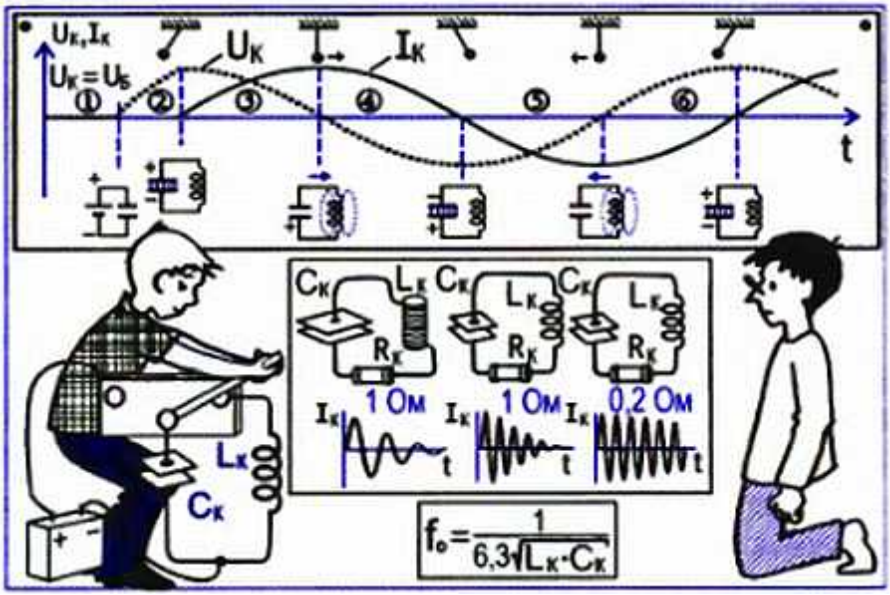
То, что заряды не уходят с пластин заряженного конденсатора, можно упрощённо объяснить так. Электрическое поле между обкладками воздействует на атомы диэлектрика, и они несколько деформируются, поляризуются, как в наших давних опытах поляризовались атомы в кусочках бумаги под действием поля наэлектризованной палочки (Р-18). Своими зарядами поляризованный диэлектрик удерживает свободные заряды на пластинах, не даёт им уйти. В электрическом поле между пластинами, а также в поляризованных атомах диэлектрика, напоминающих сжатые пружины, запасается энергия, которая была затрачена батареей на то, чтобы зарядить конденсатор, втолкнуть избыточные заряды на его обкладки.

Конденсатор можно разрядить, для этого достаточно соединить его обкладки резистором. Через него, естественно, пойдёт разрядный ток, и электроны уйдут с обкладки, где они в избытке (-), на ту обкладку, где их не хватает (+). И при этом обнаружится чрезвычайно интересное явление, которому посвящён специальный раздел Т-113. Но прежде чем двинуться дальше, придётся сообщить некоторую не очень приятную подробность о хранении энергии в конденсаторе. Он, конечно, мог бы хранить её бесконечно долго, но практически этого не бывает. Даже если не соединять обкладки, не создавать умышленно разрядный ток, происходит медленный, а иногда и

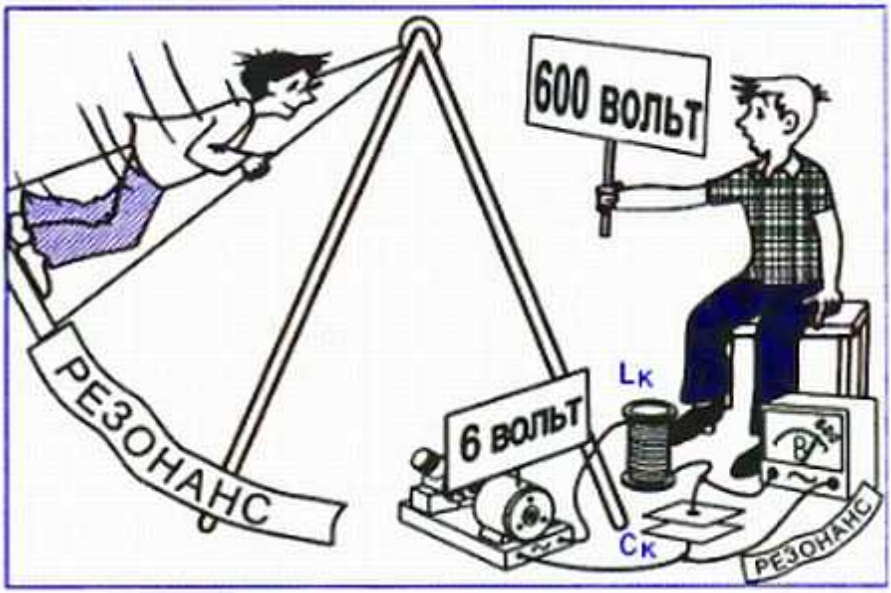
быстрый саморазряд конденсатора, заряды постепенно уходят с его пластин. Например, через воздух, где всегда есть какое-то количество свободных зарядов, или через собственный диэлектрик, который тоже не бывает идеальным.



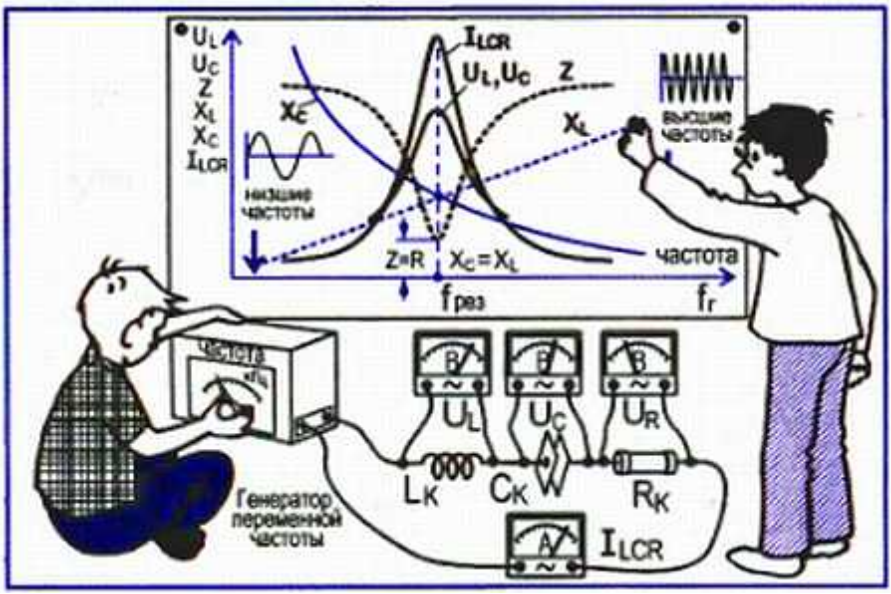
ВК-131. *Среди бессчётного множества процессов, которые происходят в мире, есть довольно большая группа, названная «свободные колебания». Их основа — физические, химические, биологические, социальные и иные колебательные системы. Каждая — это пара особым образом связанных накопителей какого-либо ресурса, например энергии. Они непрерывно обмениваются энергией, которую получила система, и в процессе этих свободных колебаний энергия собирается то в одном накопителе, то в другом.*



ВК-132. *Типичная колебательная система контур из* $L_к$, $C_к$ *и условного* $R_к$, *отображающего неизбежные потери. Получив энергию при зарядке, конденсатор передаёт её катушке, она возвращает энергию обратно, и всё начинается сначала. Частота* f_0 *этого обмена зависит от* $L_к$, $C_к$, *и уменьшив их, можно увеличить* f_0. *А если удастся снизить потери (уменьшить* $R_к$), *то колебания будут затухать медленнее и продлятся дольше. В принципе то же самое происходит в других колебательных системах.*



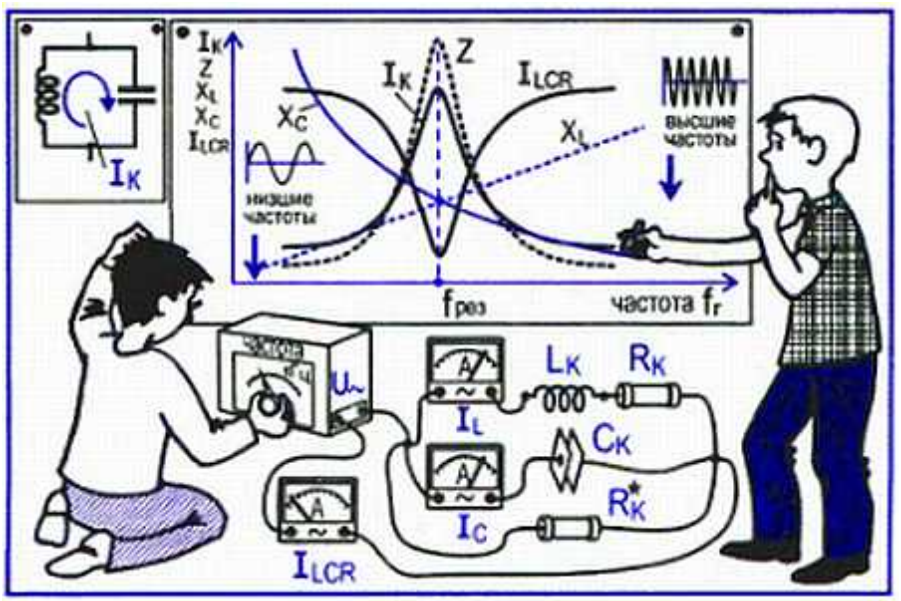
ВК-133. *В колебательной системе возможен резонанс, когда внешний генератор подпитывает систему в такт с ее свободными колебаниями. В частности, за счёт резонанса могут в десятки и сотни раз вырасти напряжения на элементах* $L_к$, $C_к$ *колебательного контура. В то же время в литературе описаны случаи, когда по мосту проходили большие подразделения солдат и из-за резонанса колебательной системы «мост» и ритма строевого шага происходили серьёзные разрушения. Иногда даже пишут, что мост рухнул.*



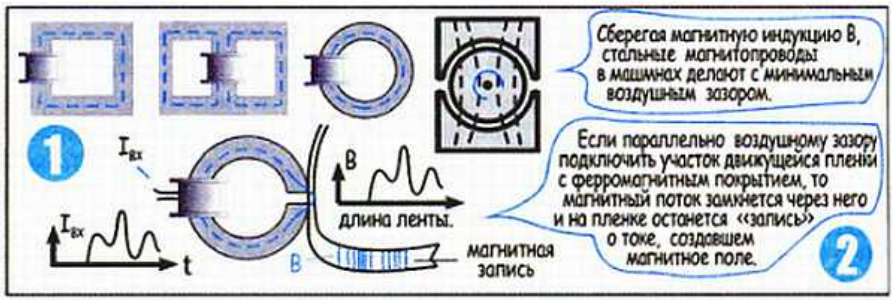
ВК-134. *Подключив последовательный контур $L_кC_к$ к измерительному генератору и постепенно меняя его частоту, мы придём к частоте собственных колебаний контура f_0, которую также называют резонансной $f_{рез}$. На ней индуктивное и ёмкостное сопротивления равны, а так как они действуют друг против друга (одно напряжение отстаёт от тока, другое опережает его), то сопротивление контура резко падает до одного лишь сопротивления потерь $R_к$. В итоге резко растёт ток в цепи и с ним напряжения на $L_к$ и $C_к$, поэтому весь процесс называют «резонанс напряжений».*

Т-112. **Электрическая ёмкость характеризует способность конденсатора, и вообще любого физического тела, накапливать электрические заряды.** Единица ёмкости — фарад, *Ф*. Конденсаторы различаются формой пластин (обкладок), их площадью и диэлектриком, который находится между ними. Обкладки конденсатора сравнительно небольшой ёмкости выполняют в виде дисков, прямоугольников или вставленных друг в друга трубок. При большей и значительно большей ёмкости конденсатор часто выполнен в виде свёрнутых в спираль металлических лент. Способность конденсатора накапливать заряды, как уже говорилось, называется его электрической ёмкостью, она измеряется в фарадах, сокращённо *Ф*, и напоминает нам имя великого исследователя электричества: Майкл Фарадей. Это имя мы ещё не раз встретим в последующих разделах книги. В формулах и текстах конденсатор обозначается

буквой С, так же, как и сам конденсатор на чертежах и схемах. Ёмкость 1 фарад имеет такой конденсатор, который под действием постоянного напряжения 1 вольт накопит на своих обкладках заряд 1 кулон. Коротко это можно записать так: 1 Ф = 1 К/1 В. Попутно отметим, что единица ёмкости фарад на протяжении многих лет была словом женского рода фарада, и в такой форме его можно встретить в книгах ещё не столь далёкого прошлого.



ВК-135. *В параллельном контуре на низких частотах малоиндуктивное сопротивление, и оно шунтирует контур. На высоких частотах контур шунтирует ёмкостное сопротивление, которое здесь очень мало. Лишь на резонансной частоте* $f_{рез}$ *(она же* f_0*) никто никого не шунтирует, общее сопротивление контура* Z *оказывается достаточно большим и общий ток* L_{LCR} *через контур уменьшается. Но внутри параллельного контура общее сопротивление падает, а ток* $L_к$*, растёт, оправдывая название «резонанс токов».*

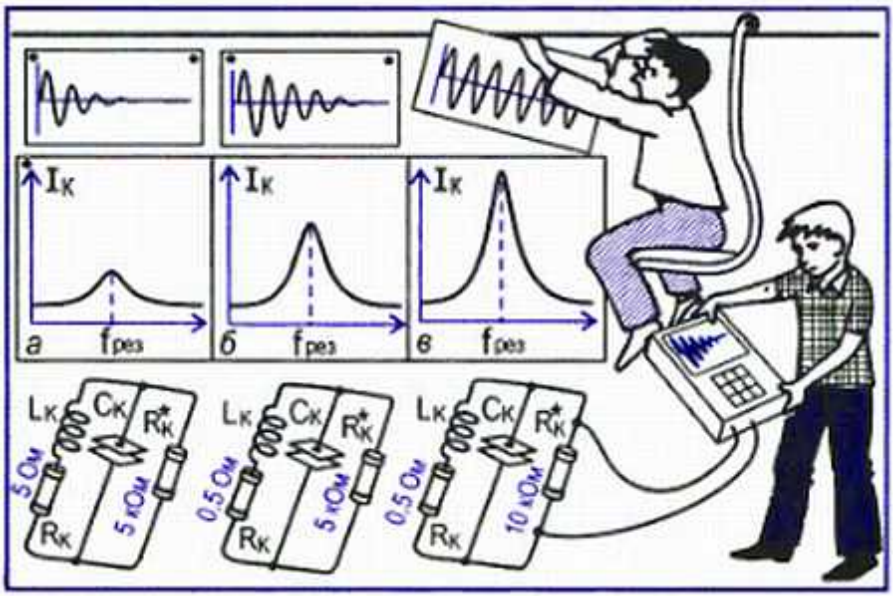

Сберегая магнитную индукцию B, стальные магнитопроводы в машинах делают с минимальным воздушным зазором.
1
$I_{вх}$
B
длина ленты.
$I_{вх}$
t
B
магнитная запись
Если параллельно воздушному зазору подключить участок движущейся пленки с ферромагнитным покрытием, то магнитный поток замкнется через него и на пленке останется «запись» о токе, создавшем магнитное поле.
2

Р-47. ПОПУЛЯРНЫЕ ПРОФЕССИИ ФЕРРОМАГНИТНОГО СЕРДЕЧНИКА. Для того чтобы увеличить реальную силу магнитного поля (магнитную индукцию B), в котором находятся обмотки электрических машин и аппаратов, эти обмотки размещают на ферромагнитных сердечниках — ш-образных, п-образных и круглых (1). Электромагнит на ферромагнитном сердечнике с тонким парамагнитным или диамагнитным зазором можно использовать для записи изменений электрического тока, например тока в цепи микрофона, то есть практически для записи звука. Мимо зазора в электромагните (его в этом случае называют записывающей головкой) протягивают прижатую к сердечнику тонкую пластиковую ленту с ферромагнитным покрытием (2). Магнитное поле сердечника, естественно, замыкается по пути наименьшего сопротивления, то есть не через сам зазор, а через ферромагнитное покрытие плёнки. При изменении тока в обмотке электромагнита меняется его магнитное поле, то есть меняется поле, намагничивающее ферромагнитную плёнку. В итоге все изменения тока отражены в остаточной намагниченности ферромагнитной плёнки и в таком виде могут храниться вечно. Подобным же способом в видеомагнитофоне на плёнке записывают картинку, которую электрический сигнал создаёт на экране телевизора

Ёмкость *C* тем больше, чем больше площадь обкладок и чем меньше расстояние между ними. Кроме того, ёмкость определяется свойствами вещества между пластинами, о них говорит диэлектрическая постоянная ε этого вещества — чем она больше, тем больше ёмкость C. Так, если воздушный конденсатор

(между пластинами воздух, у него $\varepsilon = 1$) поместить в масло (у него $\varepsilon = 2$), то ёмкость конденсатора увеличится в два раза. Ёмкость 1 фарад (1 Ф) — чрезвычайно большая величина, чтобы получить её, диаметр круглых обкладок воздушного конденсатора должен быть более 30 километров при расстоянии между пластинами 1 миллиметр. Ёмкость шара таких размеров, как Земля, меньше тысячной доли фарада. Даже у применяемых в электрической и электронной аппаратуре конденсаторов большой ёмкости она пока в основном измеряется миллионными долями фарада — микрофарадами.

Здесь нужно заметить, что уже несколько лет в технической и рекламной литературе, посвящённой гибридным автомобилям (разумно переключаемые сравнительно маломощный бензиновый двигатель и электрические двигатели, получающие питание от подзаряжаемых аккумуляторов), появилось слово «суперконденсатор». Это сравнительно новое электрическое устройство, в гибридном автомобиле оно накапливает электрическую энергию от зарядного аппарата, который «кормится» бензиновым двигателем. Иногда суперконденсатор можно заряжать от выпрямителя, включаемого в обычную электросеть (система «плагин»), например, во время ночной стоянки. В нужный момент суперконденсатор отдаёт полученную энергию, например, в момент, когда водителю нужно «газануть», трогаясь с места. Среди важных характеристик суперконденсатора иногда указывают и его ёмкость, она составляет тысячи и даже десятки тысяч фарад — цифры, немыслимые для создателей привычных нам конденсаторов, работающих в электрической и электронной аппаратуре. У них суперконденсатор (его, кстати, часто называют «ионистор») в основном взял только часть своего имени, по устройству и назначению у него мало общего с тем, что мы привыкли называть конденсатором. По используемым процессам и некоторым особо важным характеристикам ионистор (суперконденсатор) ближе к аккумулятору, который тоже является хранителем запасов электрической энергии. Ёмкость аккумулятора принято указывать в ампер-часах, но их легко пересчитать в привычные фарады, и получится, что ёмкость типичного автомобильного аккумулятора несколько тысяч фарад.



ВК-136. *Острота резонансной кривой сильно зависит от потерь энергии в контуре — чем они меньше, тем острее кривая. Потери, бывает, оценивают двумя сопротивлениями — одно* $R_к$ *включено последовательно с катушкой и в основном отображает сопротивление её проводов. Второе сопротивление* $R^*_к$ *включено параллельно контуру и отображает влияние связанных с ним других элементов схемы. Потери в контуре тем меньше, чем меньше* $R_к$ *и чем больше* $R^*_к$*, хотя иногда считают возможным его вообще не учитывать.*

Р-48. ВНЕШНЕЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ИСЧЕЗЛО, НО В СТАЛЬНОМ СЕРДЕЧНИКЕ СОХРАНИЛАСЬ НАМАГНИЧЕННОСТЬ. Если увеличивать ток в катушке с ферромагнитным сердечником, то магнитная индукция **B** в нём будет нарастать, в основном за счёт собственной намагниченности сердечника (2, пунктирная линия). Но

при каком-то значении тока рост индукции **B** начнёт замедляться и в итоге почти совсем прекратится. Это значит, что внешнее поле уже повернуло все магнитные домены сердечника и его магнитная индукция увеличиваться уже не может. Если теперь уменьшать ток в обмотке, то индукция **B** тоже будет уменьшаться в соответствии с верхней (синей) линией сложного графика, который принято называть «петля магнитного гистерезиса». График показывает, что при нулевом намагничивающем токе будет действовать остаточная магнитная индукция $\mathbf{B}_{ост}$. Это часть магнитных доменов так и осталась в повёрнутом состоянии, обеспечивающем остаточную намагниченность. Дальнейшее изменение намагничивающего тока приводит нас в область его отрицательных значений и к новому загибу гистерезисной петли, теперь уже с противоположной магнитной полярностью по сравнению с первым (верхним) загибом. Сменив направление тока, мы начнём двигаться вверх по нижней линии гистерезисной петли и вновь придём к уже знакомому верхнему загибу.

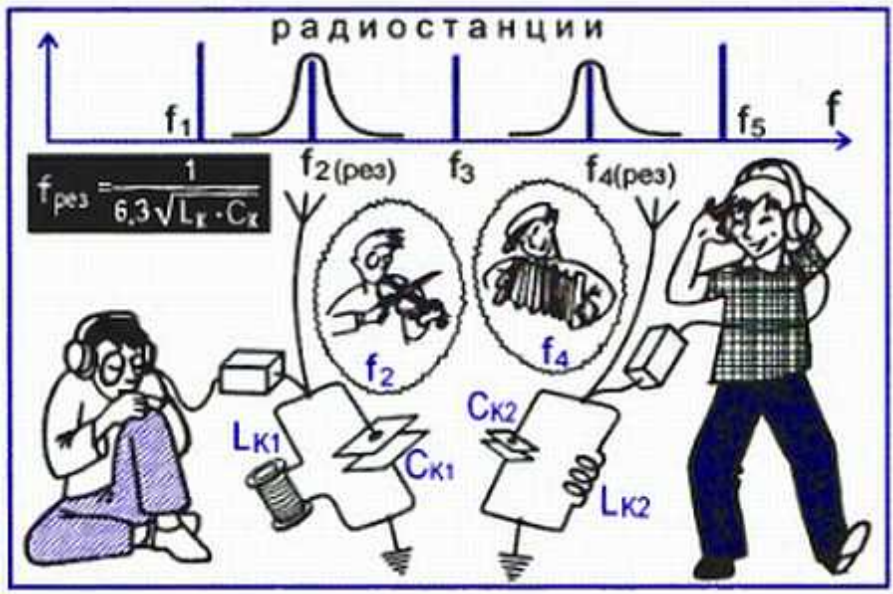
В числе практических задач — размагничивание сердечника. Просто прекратить ток в цепи для этого недостаточно — в сердечнике останется магнитная индукция $\mathbf{B}_{ост}$.Для размагничивания сердечника нужно постепенно уменьшать ток в катушке (3), так как при малых намагничивающих токах гистерезисная петля исчезает и характеристика становится такой же примерно, как и для катушки без ферромагнитного сердечника (1). В этом случае постепенное прекращение намагничивающего тока оставит сердечник полностью размагниченным.

Читателю необходимо было сообщить о существовании суперконденсаторов с огромной ёмкостью и о большом интересе, который проявляют к ним создатели гибридных автомобилей. Возможности суперконденсаторов (ионисторов) ещё, видимо, не исчерпаны, но они уже позволили получить ряд очень интересных результатов. В качестве примера можно назвать недавно показанный на международной выставке опытный образец такого примерно автомобиля, как «Жигули», потребляющего 1,5 литра бензина на 100 километров пробега (это в 5–8 раз меньше, чем потребляет обычный автомобиль) плюс сравнительно небольшое количество энергии из электросети.

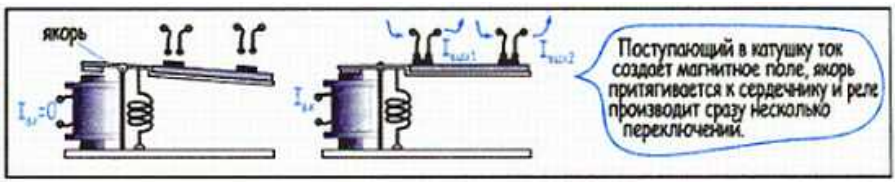
Чем больше ёмкость C конденсатора, тем больше зарядов при прочих равных условиях он может удержать на своих обкладках, тем больше энергии он запасает в своём электрическом поле. Разумеется, количество накопившихся зарядов зависит и от того, каким напряжением заряжают конденсатор: чем больше это напряжение, тем больший заряд оно втолкнёт на пластины (Т-8). Здесь, правда, существует серьёзное ограничение — на корпусе конденсатора пишут его рабочее напряжение, которое никак нельзя превышать. Иначе произойдёт пробой, диэлектрик разрушится, обкладки оплавятся и, возможно, замкнутся накоротко — конденсатор превратится в простой проводник.

Особое место занимают электролитические конденсаторы, у которых много общего с химическими источниками тока. Включают их так, чтобы к конденсатору было приложено постоянное напряжение и обязательно той полярности, какая указана на корпусе. Только в этом случае у электролитического конденсатора будет его номинальная ёмкость.

Т-113. **Конденсатор, объединившись с резистором, может стать элементом отсчёта времени.** Коротко повторим пройденное. В момент, когда мы подключаем конденсатор к батарейке, в цепи появляется некоторый зарядный ток — это свободные электроны уходят с одной обкладки и накапливаются на другой, на обкладках появляются свои собственные + и В первый момент зарядный ток довольно большой, но постепенно он уменьшается — батарейке становится всё труднее вталкивать заряды в конденсатор (Т-8). Когда же он наберёт весь заряд, какой может набрать, то зарядный ток прекратится. Напряжение на конденсаторе при этом будет равно напряжению заряжавшей его батареи.



ВК-137. *Такие примерно картинки сто лет назад печатали радиожурналы, объясняя частотное разделение каналов. В антенне каждого приёмника радиоволны многих станций мира создают свои переменные токи. Как из этой смеси выбрать одну станцию? Как перейти с неё на другую? Эти задачи и решал колебательный контур приёмника, резонансную частоту которого можно было менять. Каждая станция работала на своей частоте, и контур, настроившись на неё, за счёт резонанса делал её слышимой и доступной.*


якорь
Поступающий в катушку ток создаёт магнитное поле, якорь притягивается к сердечнику и реле производит сразу несколько переключений.

Р-49. РЕЛЕ — ОЧЕНЬ ПРОСТЫЕ И ВАЖНЫЕ СОВМЕСТНЫЕ ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА И МАГНЕТИЗМА. Самое, пожалуй, простое взаимодействие электричества и магнетизма можно увидеть в электротехническом устройстве по имени реле (от французского глагола «релейр» — «сменять, заменять»). Когда к реле подводится управляющий входной сигнал $U_{вх}$, по катушке электромагнита идёт ток и его сердечник притягивает стальной якорь. Он перемещает

пластинку изолятора, на которой закреплены подвижные контакты, каждый из них замыкает свою пару неподвижных контактов, и реле включает две мощные электрические цепи. Существует огромное многообразие реле, в том числе такие, которые позволяют с помощью маломощного управляющего сигнала переключать очень большие мощности, и такие, которые позволяют одним управляющим сигналом замыкать и размыкать большое количество контактов. В момент, когда на реле не подаётся управляющий сигнал, пружина оттягивает якорь от сердечника и подвижные контакты бездействуют.

Чем больше ёмкость C, чем больше зарядов должен накопить конденсатор, тем дольше будет продолжаться процесс заряда, тем дольше будет существовать в цепи зарядный ток. А если последовательно с конденсатором С в зарядную цепь включить резистор R, то он уменьшит ток в цепи, и процесс заряда конденсатора будет длиться дольше.

Нетрудно догадаться, что произойдёт, если отключить заряженный конденсатор от батареи и соединить его обкладки резистором: начнётся процесс разряда, по внешней цепи избыточные электроны будут переходить со своей обкладки на другую, и в цепи какое-то время будет идти разрядный ток. Вначале он тоже сравнительно большой, но постепенно уменьшается — лишних зарядов на обкладках конденсатора становится всё меньше и меньше, напряжение на нём снижается. Разряд конденсатора, подобно заряду, длится тем дольше, чем больше ёмкость конденсатора C (то есть чем больше зарядов должно уйти с обкладок) и чем больше сопротивление R разрядной цепи. Быстрее всего разряд произойдёт, если $R = 0$, то есть если соединить обкладки накоротко.

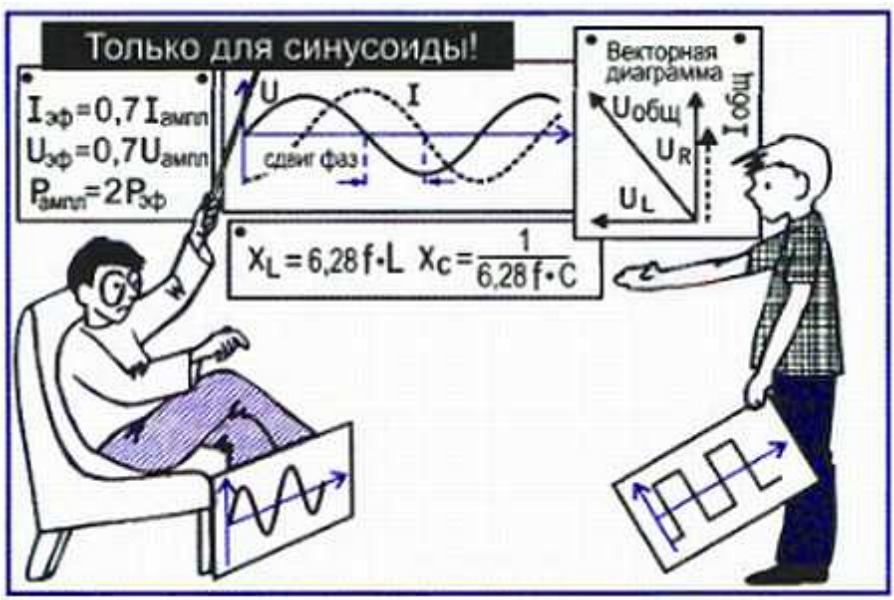
Наблюдая за зарядом и разрядом конденсатора, мы видим, что элементы электрической цепи определяют продолжительность тех или иных процессов, в данном случае время заряда и время разряда. Электрическая цепь, состоящая из C и R, или, как её часто называют, RC-цепочки, в данном случае чем-то напоминает песочные часы, «время разряда» которых зависит от количества песка и диаметра пропускного отверстия.

Чрезвычайно важная особенность RC-цепочки: её электрическое состояние может достаточно быстро меняться. И более того, мы можем управлять этим процессом, изменяя ёмкость конденсатора C или (и) сопротивление резистора R.

Знакомясь с разными видами электромагнитной индукции, мы уже видели, как электрическое или магнитное состояние изменяется во времени, но здесь, в *RC*-цепочке, эти изменения особенно наглядны, и не случайно произведение RC называют постоянной времени.

Во всём, что рассказывалось до сих пор, во всех примерах электрических цепей, на всех наших учебных рисунках фигурировал один тип электрического генератора — химический источник тока, а конкретно, гальванический элемент или несколько последовательно соединённых элементов, их батарея. Непременная особенность этого источника тока состоит в том, что он создаёт постоянную, не меняющуюся э.д.с., за что вместе с некоторыми другими генераторами получил почётное звание «источник постоянного тока», или, иначе, «генератор постоянной э.д.с. (постоянного напряжения)». Кстати, как уже говорилось, батарейкой часто называют и один гальванический элемент, что конечно, неправильно. В переводе «батарея» означает некоторый комплекс, в частности, соединённые последовательно гальванические элементы, но что поделаешь, почему-то так принято.

Появившаяся в этом разделе КС-цепочка даёт повод подумать об иных генераторах, они, в отличие от химических, создают не постоянную, а меняющуюся э.д.с. (напряжение). В их числе главный кормилец всей электроэнергетики — генератор переменной электродвижущей силы, с которой мы начнём знакомиться в следующей главе.



ВК-138. *Всё, что до сих пор было рассказано о переменном токе, относится только к одной его разновидности — к синусоидальному току. Только его эффективное значение составляет примерно 70 % амплитуды, для других токов здесь может быть иная цифра от нуля до 100 %. Точно так же нужны будут совсем другие формулы для подсчёта реактивных сопротивлений конденсатора и катушки, резонансной частоты, коэффициента трансформации, добротности контура и других характеристик.*

С
b
ток
левая рука
a
выталкивание
Ю
Мы видим как взаимодействуют два магнита - внешний и проводник с током. Правило левой руки позволяет определить, куда внешнее магнитное поле перемещает проводник с током. Такое выталкивание проводника - основа электродвигателей.

Р-50. ОСНОВА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ — МАГНИТНОЕ ПОЛЕ — ДВИГАЕТ ПРОВОДНИК С ТОКОМ. Как мы уже давно понимаем, проводник, по которому идёт электрический ток, — это самый настоящий магнит. И если поместить этот магнит (проводник с током) во внешнее магнитное поле, то произойдёт взаимодействие двух магнитов. Правда, направление магнитных полей проводника с током такое, что мы не увидим привычного притягивания к какому-либо полюсу внешнего магнита или отталкивания от него (Р-43.4). В данном случае поля взаимодействуют так, что проводник с током выталкивается из внешнего магнитного поля. Направление выталкивания можно достаточно просто определить по правилу левой руки: если её ладонь обращена к северному полюсу внешнего магнита, а вытянутые четыре пальца показывают направление тока в проводнике (не забывайте — от «плюса» к «минусу»!), то отогнутый большой палец покажет, куда будет выталкиваться проводник. Это выталкивание можно использовать в двигателе, где электрическая энергия, затраченная на создание тока в проводнике, в итоге будет выполнять определённую механическую работу.

Т-114. **Свободные электрические заряды, создавая ток, двигаются очень медленно, а вот электрическое и магнитное поля несутся со скоростью света**. Размышляя об электрических и магнитных полях, хочется вспомнить об одном любопытном факте. На него не пришлось обратить внимание в предыдущих разделах, поскольку нашим главным подопытным объектом была электрическая цепь очень малой протяженности — карманный фонарик. А теперь представьте себе, что мы растянули электрическую цепь фонарика километров на сто, и на одном конце цепи осталась батарейка с выключателем, а на другом — лампочка.

Будем считать, что напряжение батареи и сопротивление проводов выбраны правильно, и лампочке достаются необходимые ей 3 вольта. Вопрос в другом: с каким опозданием зажжётся лампочка после того, как мы нажмём на выключатель? Оказывается, она зажжётся без опоздания, точнее, с практически нулевым опозданием на небольшое количество миллионных долей секунды. Неужели электроны пробегут 100 километров за такое ничтожное время, двигаясь по проводнику с огромным количеством препятствий — неподвижных атомов?

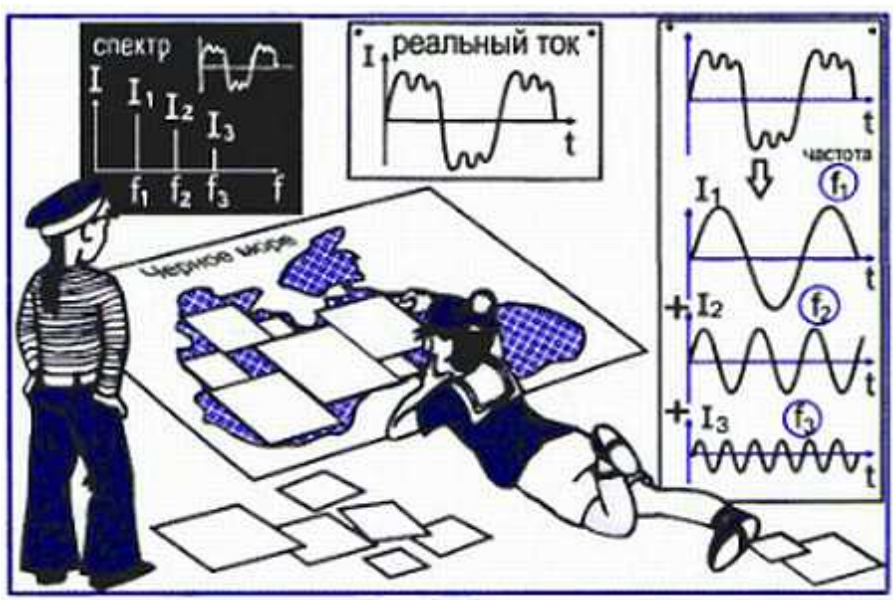
Нет, в твёрдом теле электроны так быстро двигаться не могут, их скорость обычно составляет несколько сантиметров или даже несколько миллиметров в минуту, и до лампочки они добирались бы несколько месяцев. А лампочка зажигается без опоздания потому, что при включении нашего растянутого фонарика электроны практически сразу, одновременно начинают двигаться во всей цепи, в том числе и в лампочке. Происходит это из-за того, что между выводами батареи, между её «плюсом» и «минусом», всегда действует электрическое поле. При замыкании контактов выключателя поле мгновенно продвигается по продолжению этих выводов — по всей двухпроводной соединительной линии. При этом поле повсюду, где оно появляется, сразу же заставляет двигаться электроны в проводнике — ток начинается практически одновременно во всей цепи. Чтобы было ясно, с какой ничтожной погрешностью здесь использовано слово «одновременно», сообщим, что электрические и магнитные поля продвигаются в пространстве со скоростью света, то есть со скоростью 300 000 километров в секунду. Это вполне понятно — сам свет не что иное, как электромагнитная волна, то есть взаимосвязанные и непрерывно меняющиеся электрические и магнитные поля.

Завершая свою очередную экскурсию в мир электрических и магнитных полей, мы возвращаемся к тому, о чём уже частично

говорили, с чего эта экскурсия начиналась. Мы возвращаемся к магнитному полю и взаимодействию меняющегося внешнего магнитного поля с проводником.

Т-115. **Проводник, пересекая магнитное поле, указывает прямой путь к созданию электрических генераторов**. Так сложилось, что при сотворении человека, как, впрочем, всех других живых существ, совершенно не была использована такая удобная и популярная в природе и технике разновидность движения, как вращение. Всё, что мы делаем — достаём ли мы чашку с кухонной полки, прогуливаемся ли по лесной опушке или играем на мандолине, — мы в основном совершаем возвратно-поступательные движения, чаще всего двигая что-либо по несколько искривлённой траектории.

Зато человек взял реванш при создании машин, в них вращение используется везде, где это возможно. Вращается автомобильное колесо, с огромной скоростью перемещая машину по автостраде, вращается деталь в токарном станке, магнитный диск в компьютере, гребной винт катера, сверло в бормашине дантиста. Пытаясь использовать силу, выталкивающую проводник с током из магнитного поля, то есть пытаясь создать электрический двигатель, мы в итоге тоже пришли к вращательному движению — именно оно конечная продукция практически всех электромоторов.



ВК-139. *Многие расчётные формулы пригодны, оказывается, только для синусоидального тока. Он встречается чаще всего, но в*

электрических цепях работают и токи, которые меняются иначе, и для них неприменима знакомая нам электротехника. И вывод: сложный ток представляют в виде равноценной ему суммы синусоидальных составляющих, её называют спектром тока. Эта операция напоминает представление сложной фигуры, например поверхности моря, в виде суммы простых фигур, например квадратов.

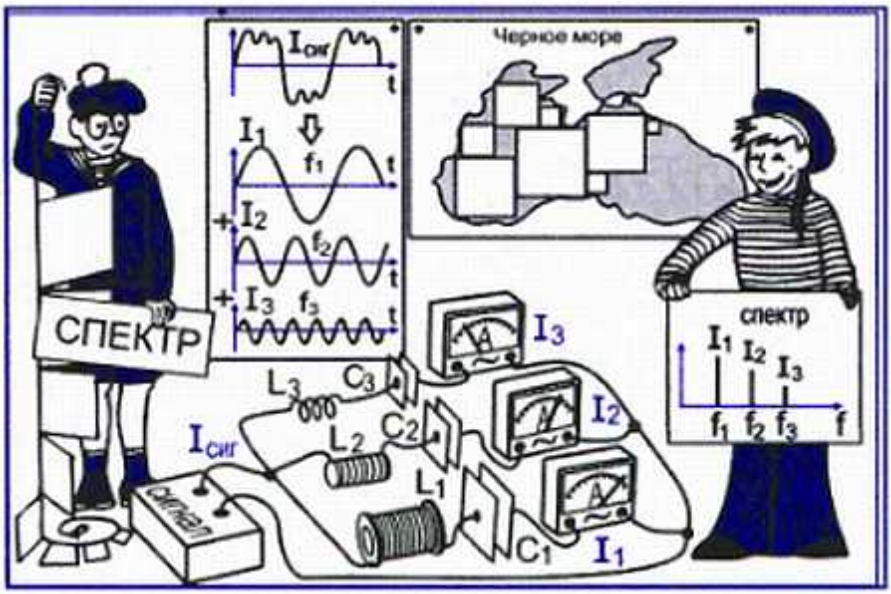
Р-51. БЛЕСТЯЩАЯ ИДЕЯ СКОЛЬЗЯЩИХ КОНТАКТОВ В НАЧАЛЕ ПРИНОСИТ РАЗОЧАРОВАНИЕ. Без долгих рассуждений и дискуссий примем решение: электрический двигатель должен создавать вращательное движение, наиболее удобное для многих областей техники. В простейшем случае неподвижная часть двигателя (статор) — это постоянный магнит или электромагнит, между его полюсами находится вращающаяся часть двигателя (ротор), по обмотке которого мы пропускаем ток. Этот ток нужно пропускать так, чтобы провода ротора всегда поддерживали его вращательное движение, выталкиваясь из внешнего магнитного поля. Чтобы упростить картину, будем считать, что в двигателе используется простейший ротор, выполненный в виде рамки, По её проводам **а** и **б** идёт ток, полученный от какого-либо генератора, например от батареи. Рамка непрерывно вращается, и поэтому самый простой способ подвести к ней ток — это использовать контакты батареи, скользящие по вращающимся контактным кольцам на оси двигателя, к которым подключены провода рамки (1). Однако простая и гениальная идея скользящих контактов и вращающихся вместе с осью двигателя двух контактных колец, соединённых с проводами рамки, в данном случае не

работает. Когда рамка окажется в горизонтальном положении, движение прекратится, к этому приведёт определённое по правилу левой руки выталкивание проводов а и б из внешнего магнитного поля (2).

Познакомившись с физической основой электродвигателя, с воздействием магнитного поля на проводник с током, мы тут же, используя великое открытие Фарадея, освоили и обратный процесс: если перемещать проводник в магнитном поле, то в этом проводнике наведётся электродвижущая сила, и он, по сути дела, превратится в источник электрической энергии, в генератор. Правда, от первых фарадеевских опытов до реального генератора ещё далековато — чтобы непрерывно получать от проводника электродвижущую силу, проводник этот нужно двигать тоже непрерывно.

Пытаясь найти решение, пойдём по проторенной дорожке — будем непрерывно вращать проводник в магнитном поле. Для удобства вращать будем сразу два проводника, такую же, как в двигателе, рамку. Наведённую э.д.с. (ток) можно снимать с вращающейся рамки через два знакомых нам полукольца простейшего коллектора с двумя скользящими контактами (Р-55). Мы пытаемся воспроизвести генератор постоянного тока, других генераторов мы пока просто не знаем. Коротко говоря, нам нужно, чтобы в проводах рамки наведённый ток всегда двигался в одну и ту же сторону.

Вспомнив правило правой руки (Р-55.1), обнаружим, что э.д.с., наведённая в обоих проводниках рамки, всегда будет складываться, напоминая последовательное включение двух гальванических элементов. При переходе из верхней полуокружности в нижнюю или из нижней в верхнюю каждый из проводников начнёт пересекать магнитное поле в противоположном направлении, и необходимая нам полярность э.д.с., наведённой в проводниках рамки, изменится на обратную. Именно в этот момент коллектор произведёт необходимые переключения, и полярность напряжения на выходе генератора не изменится, «плюс» и «минус» останутся на тех же скользящих контактах (выводы генератора), на каких и были.

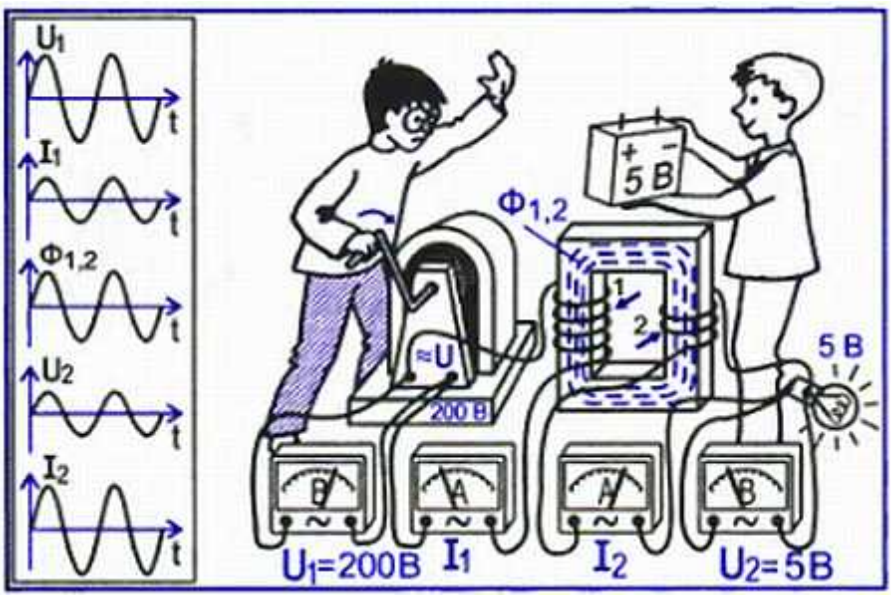


ВК-140. *Нахождение спектра — давно отработанная математическая операция. Но можно и «живьём» извлечь из спектра его синусоидальные составляющие, те самые, что вместе создают исходный сложный ток. Извлекают эти составляющие с помощью настроенных на их частоту колебательных контуров, они выделяют синусоидальный ток своей резонансной частоты. Спектр изображают на особом графике в виде вертикальных линий, каждая показывает частоту и амплитуду одной из составляющих спектра.*

Наш простейший генератор с вращающейся рамкой выдаёт э.д.с., постоянную по направлению, но изменяющуюся по величине. Это вполне объяснимо — проводники рамки бегут по окружности с одной и той же угловой скоростью, но магнитное поле в разные моменты времени они пересекают с разной скоростью — иногда очень быстро, а иногда вообще не пересекают, как бы скользят вдоль него. Электродвижущая сила, которая при этом наводится в рамке, называется пульсирующая э.д.с. (при включении нагрузки она создаёт пульсирующий ток), и лучшего названия не придумаешь — при каждом обороте рамки генератор выдаёт два всплеска, два импульса э.д.с. (тока) одной и той же полярности. Об этой ситуации мы ещё поговорим подробно, а пока подумаем, какие можно принять меры, чтобы сгладить пульсации э.д.с. и получать от генератора примерно то, что мы всегда получали от батареи, — постоянное напряжение.

Во-первых, во вращающейся части генератора, в его роторе,

можно увеличить число рамок и, соответственно, число коллекторных пластин. Уже при двух рамках за каждый оборот ротора произойдёт не два всплеска э.д.с., а четыре, то есть пульсации э.д.с. станут чаще, неприятные перерывы между импульсами станут короче. Во-вторых, для сглаживания пульсаций на выходе генератора можно включить конденсатор. При больших значениях э.д.с. конденсатор будет заряжаться, а когда э.д.с. сильно упадёт, он, разряжаясь, будет подпитывать внешнюю цепь вместо генератора, будет поддерживать на его выходе более высокий уровень напряжения — конденсатор будет сглаживать пульсации. Этот последний пример, несколько забегая вперед, намекает на то, что у схемотехники есть много разных инструментов влияния на электрические процессы.



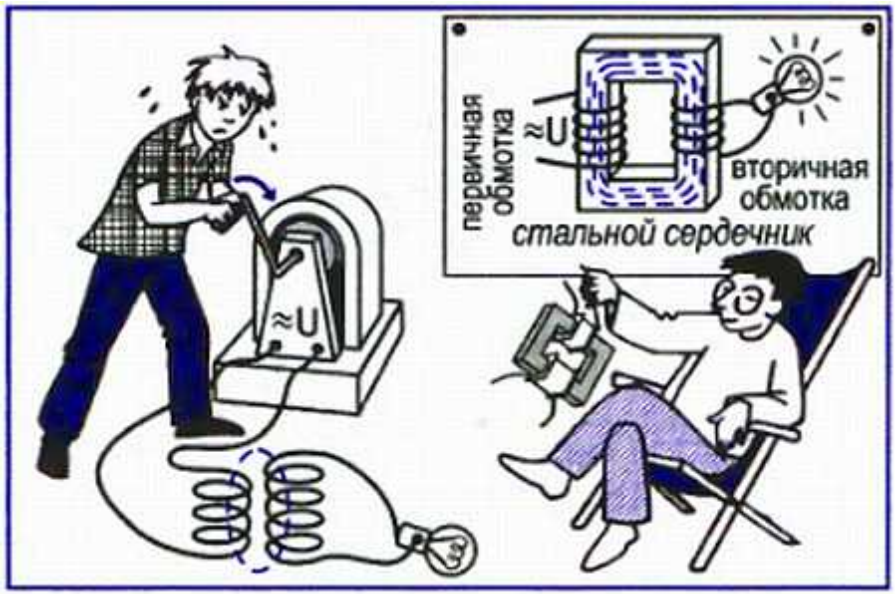
ВК-141. *Настало время поговорить о трансформаторе, об одной из самых распространённых электрических машин. Трансформатор для основных наших электрических цепей (напоминаем: частота 50 герц, напряжение 220 вольт) это замкнутый стальной сердечник, на котором две катушки: первичная обмотка 1 и вторичная 2. По обмотке 1 от генератора идёт переменный ток, и его меняющееся магнитное поле наводит э.д.с. в обмотке 2. С источником постоянного напряжения трансформатор работать не будет.*

Т-116. **Любой энергетический агрегат, в том числе электрогенератор, сам ничего не создаёт, он лишь**

преобразует один вид энергии в другой. Чтобы в рамке простейшего генератора наводилась электродвижущая сила, чтобы он оправдывал само это звание «генератор», рамку нужно вращать в магнитном поле. И при этом надо затрачивать заметные усилия, ибо рамка оказывает сопротивление, препятствует её вращению.

Такое сопротивление вполне объяснимо. Электрогенератор, если к нему подключена нагрузка, создаёт определённую электрическую мощность, выполняет определённую работу, например, заставляет светиться лампочки. Мощность P генератора подсчитывается как обычно: она есть произведение выходного напряжения на ток в цепи (Р-37). Эта мощность не может взяться ниоткуда, электрогенератор — не вечный двигатель. Значит, на создание электрической мощности генератора, то есть в итоге на вращение рамки, надо затратить какие-то усилия, нужно выполнить какую-то работу, которая, по крайней мере, не меньше, чем электрическая энергия, которую выдаёт сам генератор.

Более детально ситуация выглядит так. Потребляемый от генератора ток, естественно, проходит по рамке, а проводники с током, как известно, выталкиваются из магнитного поля. Воспользовавшись правилом левой руки, можно увидеть, что сила выталкивания действует против вращения рамки, которое производится с целью получения э.д.с. Внешнюю силу приходится применять именно для того, чтобы преодолевать такое выталкивание проводника с током из магнитного поля. При этом чем больше потребляемый от генератора ток, тем больше усилий надо, чтобы преодолевать противодействие выталкивающих сил, тем большая посторонняя помощь требуется генератору.



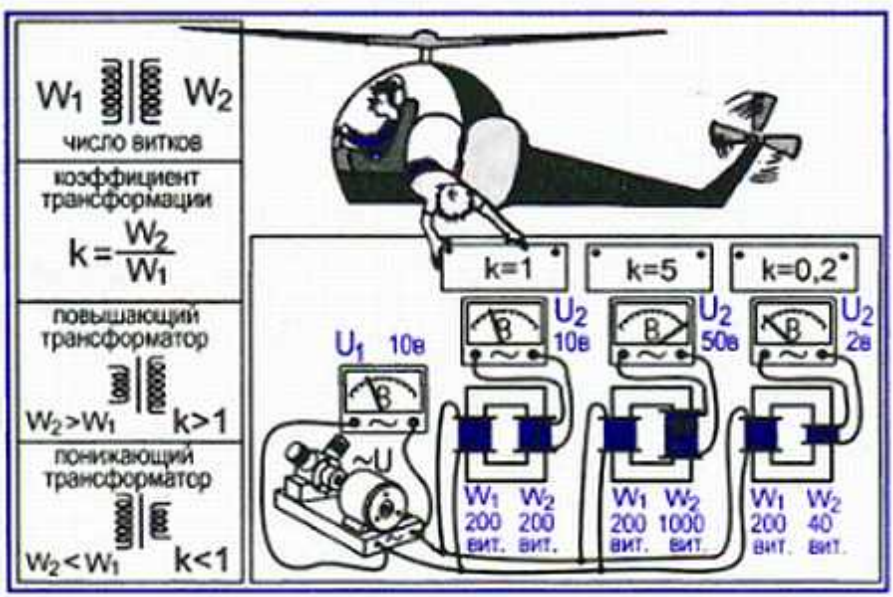
ВК-142. *Цифры, полученные в инженерных расчётах, беспощадны. В данном случае они показывают, что при частоте 50 Гц ток меняется медленно. Чтобы при таких изменениях тока получить в трансформаторе сильное меняющееся магнитное поле, проще всего использовать ферромагнитный (например, стальной) сердечник — без него понадобились бы обмотки из многих тысяч витков. При более быстром изменении тока, то есть на высоких частотах, часто используют трансформаторы вообще без сердечников.*

В реальных электрогенераторах «рамку» вращают разными способами. Заметим, что слово «рамка» взято в кавычки потому, что здесь это всего лишь образ, в настоящих генераторах вместо рамки имеются сложные системы обмоток, уложенные в стальной сердечник. Такая вращающаяся часть генератора (или двигателя), независимо от её устройства и назначения, так же как у мотора, называется «ротор», от латинского «ротаре» — «вращаться».

Итак, ротор реального генератора вращают разными способами. В автомобиле, например, с помощью приводного ремня вращение передаётся на генератор от основного бензинового двигателя, он очень небольшую часть своей мощности отдаёт для подзарядки аккумулятора и питания бортовых электроприборов. На больших электростанциях ротор электрогенератора жёстко соединяют с валом, как его называют, первичного двигателя — чаще всего это мощная паровая турбина, газовая турбина или гидротурбина. И во всех случаях

электрогенератор снабжает нас электрической энергией, превратив в неё механическую работу своего первичного двигателя. Мы ещё поговорим об этом подробнее, а пока предварительный итог: чтобы получить электрическую энергию, нужно много работать. И в широком смысле, и в узком, конкретном — нужно с помощью мощного первичного двигателя вращать ротор электрогенератора, затрачивая другие виды энергии для получения энергии электрической.

Каждый, кто думал об этом, возможно, задавался вопросом: для чего вообще в таком случае нужно электричество? Не проще ли сразу, без посредников использовать энергию сжигаемого на тепловых электростанциях топлива? Или огромную энергию падающей воды, которая крутит турбины гидроэлектростанций? Ответ на эти вопросы за пределами общих размышлений — неумолимые цифры инженерных и экономических расчётов давно доказали огромные достоинства электроэнергетики. Многие из этих достоинств связаны с применением переменного тока, к знакомству с которым мы переходим.



ВК-143. *Одна из характеристик трансформатора — коэффициент трансформации* ***k*** *(иногда буква* ***n****), показывающий отношение числа витков* w_2 *обмотки 2 к числу витков* w_1 *обмотки 1. Если коэффициент* ***k*** *больше единицы, то трансформатор повышает напряжение, если к меньше единицы, то понижает. Попутно отметим, что во сколько раз повышается напряжение, во столько же раз понижается ток — трансформатор мощности не*

меняет.

Глава 10
Постоянное непостоянство переменного тока

В первых своих попытках создать электрогенератор мы вращали проволочную рамку в магнитном поле и убедились, что в полном соответствии с законами электромагнитной индукции в рамке действительно наводится электродвижущая сила — генератор работает. Однако оказалось, что полярность наведённой э.д.с. дважды в течение одного оборота рамки меняется, и если не принять специальных мер (переключение выводов рамки с помощью коллектора), то на выводах, или, как часто говорят, на зажимах генератора, «плюс» и «минус» дважды в течение каждого оборота рамки будут меняться местами. Таким образом, мы фактически получили бы генератор переменной э.д.с., который, естественно, создавал бы в цепи переменный ток — ток, который периодически меняет своё направление, идет туда-обратно. Приученные батарейкой карманного фонарика к тому, что «плюс» и «минус» никогда своих мест не меняют, что они всегда на одних и тех же зажимах генератора, мы тут же нашли способ сохранить неизменную полярность — подключили рамку к выводам генератора через переключатель, вращающийся вместе с ней, через коллектор. Но, решив задачу, есть смысл осмотреться и увидеть, что вся электроэнергетика — это в основном энергетика переменного тока. И что, столь долго путешествуя по электрическому миру, пора обратить внимание и на него.

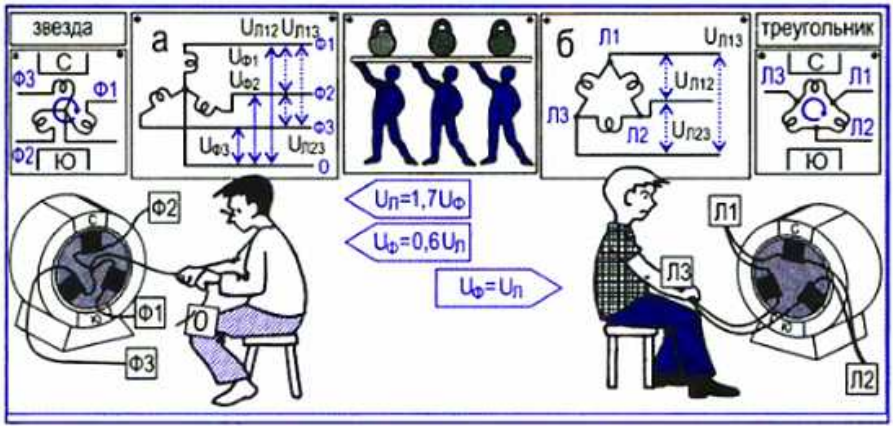
Т-117. **Если в магнитном поле равномерно вращать проводник, то в нём наведётся переменная синусоидальная э.д.с.** Настал момент более внимательно всмотреться в проводник, который вращается в магнитном поле, понаблюдать, как меняется наведённая в нём электродвижущая сила (Р-56). Для начала вспомним, что наведённая э.д.с. зависит от скорости движения проводника. Но речь идёт не о движении вообще, куда угодно. Наведённая в проводнике э.д.с. зависит от того, с какой скоростью проводник пересекает магнитное поле, с какой скоростью он движется перпендикулярно полю, перпендикулярно

направлению, в котором в этом поле установилась бы пробная магнитная стрелка. Для начала посмотрим на простейшую модель машинного электрогенератора переменной э.д.с., где она наводится в рамке и снимается с двух вращающихся металлических колец с помощью двух скользящих контактов. Процесс наведения этой э.д.с. очень прост и в то же время очень важен, поэтому мы сейчас разберём его подробно, как говорится, раз и навсегда.

Когда провода *a* и *b* рамки проходят в районе полюсов внешнего (статорного) магнита, в них наводится максимальная электродвижущая сила. И совсем не потому, что провода *a* и *b* находятся вблизи от полюсов внешнего магнита, это здесь ни при чём. Напряжение возрастает потому, что, двигаясь по своему круговому маршруту, оба провода *a* и *b* рамки именно в районе полюсов с наибольшей скоростью пересекают магнитное поле. А двигаясь в районе проходящей через центр (через ось генератора) условной горизонтальной линии, провода *a* и *b* (при неизменной скорости движения по кругу!) практически не пересекают магнитное поле, двигаются вдоль условных магнитных линий, соединяющих северный полюс внешнего магнита с южным. Естественно, что в этом районе наведённая э.д.с. очень мала и в какой-то момент даже равна нулю.

Зато, проходя мимо названной выше горизонтальной линии, провода рамки участвуют в очень интересном и важном событии. Не прекращая своего равномерного движения по кругу, провода а и Ъ рамки резко меняют направление, в котором они пересекали магнитное поле. Так, например, проходя верхнюю часть своего кругового пути, провод а пересекал магнитное поле, двигаясь справа налево. А пройдя горизонтальную линию и продолжая двигаться по своей круговой трассе, провод а будет пересекать магнитное поле в направлении слева направо. Аналогично провод, который вначале двигался в нижней части круга слева направо, пересечёт горизонтальную линию в правой её части и будет перемещаться по верхней части своего кругового маршрута справа налево. При этом согласно правилу правой руки изменится полярность напряжения, наведённого в каждом из проводников. А значит, два раза за время одного оборота рамки меняется полярность генератора. Если к нему подключить нагрузку, то по ней пойдёт переменный ток.

О том, как меняется наведённая э.д.с. при вращении проводника в магнитном поле, лучше всего рассказывает график (Р-57).



ВК-144. *К потребителю трёхфазный ток чаще всего поступает с трансформатора, вторичная обмотка которого соединена звездой. К разным участкам сети, например к разным подъездам, подводят разные фазовые напряжения* $U_ф$. *К мощным аппаратам можно подвести более высокое линейное напряжение* $U_л$ *или при необходимости все три фазы* $U_{ф1}$, $U_{ф2}$ *и* $U_{ф3}$. *При соединении выходных обмоток трансформатора треугольником таких возможностей выбора нет. Всё это относится и к соединению обмоток генератора.*

С
Ю
а
б
1
2
Переключатель из двух полуколец дважды в течение каждого оборота меняет направление тока в проводах рамки так, чтобы они, выталкиваясь из магнитного поля, поддерживали непрерывное движение рамки по кругу.

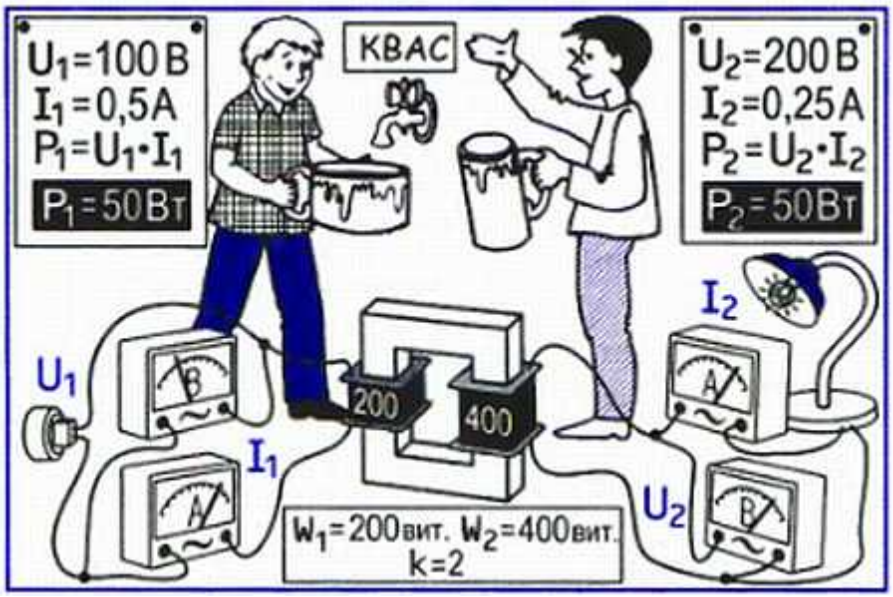
Р-52. ДВИГАТЕЛЬ НОРМАЛЬНО РАБОТАЕТ, ЕСЛИ НЕСКОЛЬКО ИЗМЕНИТЬ СИСТЕМУ СКОЛЬЗЯЩИХ КОНТАКТОВ. Нам нужно, чтобы потребляющая от батареи ток рамка (упрощённый ротор двигателя) двигалась по кругу, всегда получая поддержку внешнего магнитного поля. Одно из самых простых решений

проблемы — нужно каждые пол-оборота менять направление тока в проводах рамки. И тогда, хоть на миллиметр проскочив по инерции среднее положение, рамка будет опять выталкиваться из внешнего магнитного поля в сторону своего вращения. Для того чтобы произвести такое переключение проводов, проще всего заменить контактные кольца системы скользящих контактов контактными полукольцами (1), одно из которых соединено с началом рамки (провод **а**), а другое — с её концом (провод **Ь**). К одному из этих полуколец прижат скользящий контакт «плюса» батареи, к другому полукольцу так же подключён её «минус». Но через половину оборота скользящие контакты (то есть выводы батареи) окажутся подключёнными к другим полукольцам, и направление тока в рамке изменится (2). Теперь, согласно правилу левой руки, внешнее магнитное поле будет двигать провода рамки, поддерживая её вращение.

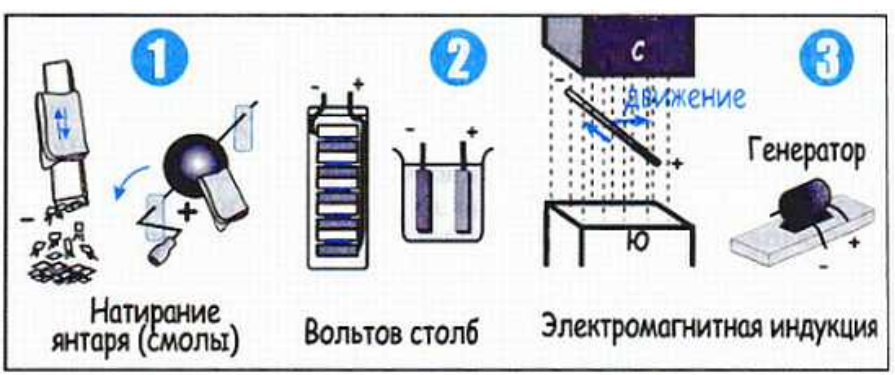
Т-118. **График — особый рисунок, наглядно демонстрирующий, как одна какая-либо величина зависит от другой**. О необходимости знать язык графиков было сказано в самом начале (Т-7), и откладывать это знакомство дальше уже невозможно. Основа графика — две взаимно перпендикулярные линии, две, как их называют, оси — вертикальная и горизонтальная. По вертикальной оси в определённом масштабе откладывают ту величину, об изменениях которой мы хотим рассказать. А по горизонтальной оси в своём определённом масштабе откладывают ту величину, от которой зависит первая величина, то есть та, которая отмеряется по вертикальной оси. «В определённом масштабе» означает, что если, например, отмеряется масса, то 1 мм на какой-либо оси (вертикальной либо горизонтальной) соответствует 1 г (одному грамму) или 1 кг, как мы условимся. Если отмеряется температура, то 1 мм — это уже может быть 1 градус, если ток, то 1 А, если напряжение — 1 В. Иногда оси называют латинскими буквами «икс» и «игрек»: горизонтальная — ось *x*, вертикальная — ось *y*. Отсчёт ведётся от точки пересечения осей, то есть от точки 0.

У языка графиков в ещё большей мере проявляется достоинство, которое характерно для языка формул: одного взгляда на график достаточно, чтобы почувствовать зависимость, о которой он рассказывает. Попробуйте сами построить график, иллюстрирующий, например, закон Ома: зависимость тока *I* в

простейшей цепи с одним резистором R (ток откладывается по вертикальной оси y) от электродвижущей силы E или (и) сопротивления цепи R (они откладываются по горизонтальной оси x). Для начала задайтесь постоянной величиной э.д.с., например 20 В, и начинайте увеличивать R, например от



ВК-145. *Уже пару раз отмечалось, что трансформатор, в зависимости от соотношения числа витков в обмотках, повышает или понижает ток и напряжение, но мощности никогда не меняет — сколько её поступило на вход в первичную обмотку, примерно столько же (немножко меньше из-за потерь энергии) будет на выходе во вторичной обмотке. Мы повторяем этот очевидный факт ввиду его исключительной важности. И еще потому, что его очень несложно запомнить, но он почему-то очень часто забывается.*



Р-53. В РАЗНЫЕ ВРЕМЕНА ЧЕЛОВЕЧЕСТВО ОТКРЫЛО ТРИ РАЗНЫХ ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРИЧЕСТВА. Природа не делала секретов из электромагнетизма, и миллионы лет человек видел полыхающие на грозовом небе молнии. Но никто, конечно, в те далёкие времена не знал природу этих грозных небесных спектаклей и не связывал их с находками на самой земле. Четыре-пять тысяч лет назад люди обнаружили камни, притягивающие гвозди и другие железные предметы. Камни эти (железную руду с магнитными свойствами) назвали магнитом, говорят, по имени жившего на острове Крит пастуха Магнеса, который нашёл и показал землякам эти камни. По другой версии название появилось по имени горы Магнезия на том же Крите, возле которой существуют залежи железной руды с магнитными свойствами.

С электричеством дело оказалось похуже. На земле не было песков или вод, которые имели бы готовые электрические свойства, как некоторые железные руды имеют магнитные. Ходили слухи о том, что философ Фалес из греческого города Милет (на территории нынешней Турции) ещё около трёх тысяч лет назад знал, как натирание янтаря создаёт у него некоторые особые свойства, благодаря которым янтарь притягивает лёгкие предметы — клочки шёлка, пёрышки и пушинки. Только триста лет назад этим свойствам дали имя «электричество» от латинского слова «электрон» — «янтарь».

Совершенно новые возможности появились в 1800 году, когда Алессандро Вольта представил миру созданный им химический генератор электричества, как его потом называли «Вольтов столб» (2) — два металлических электрода, погружённых в жидкий или пастообразный электролит. Химические реакции между электролитом и электродами приводили к тому, что на одном из них появлялся избыток положительных зарядов («плюс»), а на другом — избыток электронов («минус»). С помощью Вольтова столба за несколько десятилетий было сделано много открытий — от законов постоянного тока до электромагнитной индукции (3), которая в дальнейшем сама стала источником электричества. Через 30 с лишним лет после появления Вольтова столба

Майкл Фарадей обнаружил, что в проводнике, который находится в меняющемся магнитном поле, наводится электродвижущая сила. Но прошло несколько десятилетий, пока это открытие превратилось в действующие машины, снабжающие электричеством сначала отдельные дома, а затем большие города и целые страны.

одного ома, каждый раз на один ом. Подсчитанную величину тока сразу же отмечайте на графике, поставив в нужном месте точку. Затем соедините эти точки, и вы получите убывающую кривую, которая покажет, как уменьшается ток в цепи, если возрастает её сопротивление. Сначала с каждым дополнительным омом убывает быстро, а затем всё медленнее. Это типичный график для обратной пропорциональной зависимости: чем больше R, тем меньше ток I, и во сколько раз вы увеличите R, во столько же раз уменьшится ток I. Аналогичный график можно построить, чтобы показать, как напряжение E влияет на величину тока I. Здесь на графике появится прямая линия, показывающая, как растёт ток I с увеличением E. Это несложное домашнее задание поможет вам с помощью графиков показать, а заодно и самому увидеть, как в простейшей электрической цепи меняется ток при изменении сопротивления цепи и э.д.с. в ней.

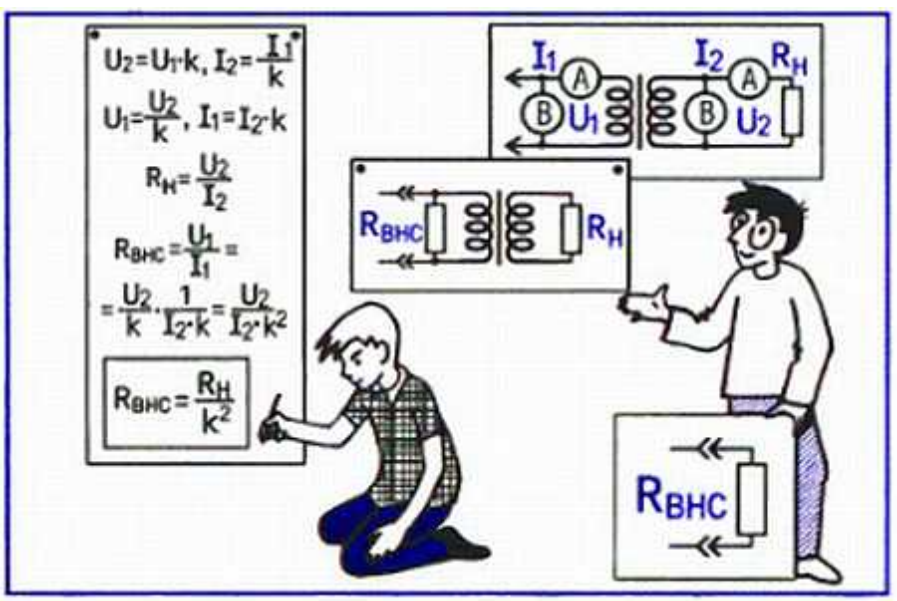
Язык графиков — универсальный язык, он может рассказать о самых разных зависимостях. График, например, может показать зависимость напряжения U на участке цепи от тока, зависимость мощности P от тока в цепи, зависимость тока I от сопротивления цепи. Точно так же график может показать, как в данном регионе меняется средняя июльская температура на протяжении последних ста лет. Или с какой скоростью двигался автомобиль во время большого туристического пробега. Или как меняется масса космической системы при выведении спутника на околоземную орбиту. В этом случае сама масса в тоннах (т) отложена по вертикальной оси, а по горизонтальной отложено то, что важнее знать: время полёта или высота подъёма ракеты-носителя. На Земле (нулевая высота) общая масса системы 20 т (все цифры условные), затем по мере подъёма выгорает топливо, и масса ракеты постепенно уменьшается. На высоте 40 км масса уменьшается резко, скачком — это отстреливается отработавшая первая ступень. Точно так же на высоте 100 км отстреливается вторая ступень, и на высоте 250 км — третья. Остаётся на орбите сам спутник — чистая масса 1 т.

Подобных примеров можно привести бессчётное множество,

но нам пора обратиться к графику переменного тока (Р-57.2), о том же, что и он, будут рассказывать многие похожие, а иногда и не очень похожие графики в этой книге. Приведённый на рисунке график помогает понять, как во времени меняется ток (э.д.с.), протекающий в цепи, которую питает машинный генератор переменного тока. Предварительно хочется обратить внимание на две особенности переменной э.д.с. (тока), о которых рассказывает график и о которых в последующих разделах будет рассказано более подробно.

Особенность первая. На рисунке показан график синусоидальной э.д.с. (тока). Их величина меняется точно так же, как меняется длина линии синуса в известном геометрическом построении, которое можно считать началом тригонометрических функций и таблиц.

Особенность вторая. На рисунке показан график переменного тока, который можно было бы считать двумя разными токами, поочерёдно протекающими в двух разных направлениях, — человек с юмором вполне мог бы назвать направление этих токов «туда» и «обратно». Уже давно и вроде бы без возражений принято изображать эти токи на одном графике — один из них рисуется как обычно, а другой, образно говоря, верх ногами, — что поделаешь, за экономию и удобства приходится чем-то платить.



ВК-146. *Довольно часто, работая с трансформатором, можно забыть о подробностях событий в его вторичной обмотке, так как*

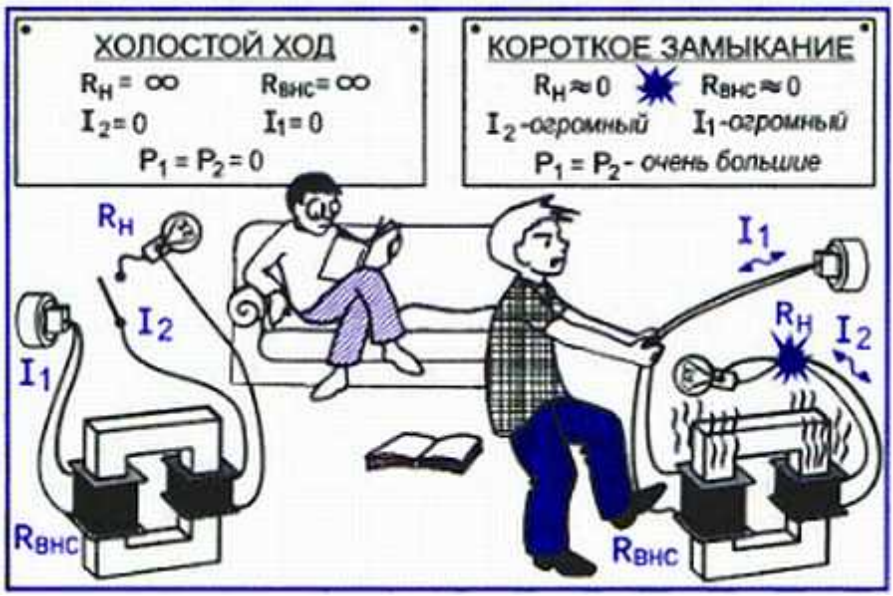
важно знать, какую нагрузку трансформатор представляет для генератора, к которому подключена его первичная обмотка. В этом случае всю вторичную обмотку вместе с её реальной нагрузкой $R_н$ *как бы переносят и пересчитывают в первичную обмотку и заменяют её условным вносимым сопротивлением* $R_{внс}$*, которое вторичная обмотка со своей нагрузкой* $R_н$ *создаёт в первичной цепи.*

Р-54. ОСНОВА ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРА: ЕСЛИ В МЕНЯЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПОМЕСТИТЬ ПРОВОДНИК, В НЁМ НАВЕДЁТСЯ Э.Д.С. Получение магнетизма из электричества, открытое в 1820 году, оказалось делом довольно простым — пропускаешь электрический ток по проводнику, и вокруг него появляется магнитное поле. То, что можно совершить обратное превращение и с помощью магнита получить электрический ток, вроде бы было сразу понятно, но поиски конкретного решения заняли немало времени. Во всяком случае, ещё в 1822 году Майкл Фарадей записал в дневнике свою главную задачу: «Превратить магнетизм в электричество». Но прошло почти десять лет поисков, неудач и ошибок, пока эксперимент подтвердил, что такое в принципе возможно, — Фарадей в эксперименте получил электромагнитную индукцию. А затем ещё несколько десятилетий ушли на создание использующих её генераторов, пригодных для широкого применения. Достаточно вспомнить, что через 60 лет после открытия электромагнитной индукции машины вырабатывали в 20 тысяч раз меньше электрической энергии, чем мы потребляем сегодня. Электромагнитную индукцию, которая стала главным поставщиком электрической энергии, сейчас представляют очень просто: в катушке

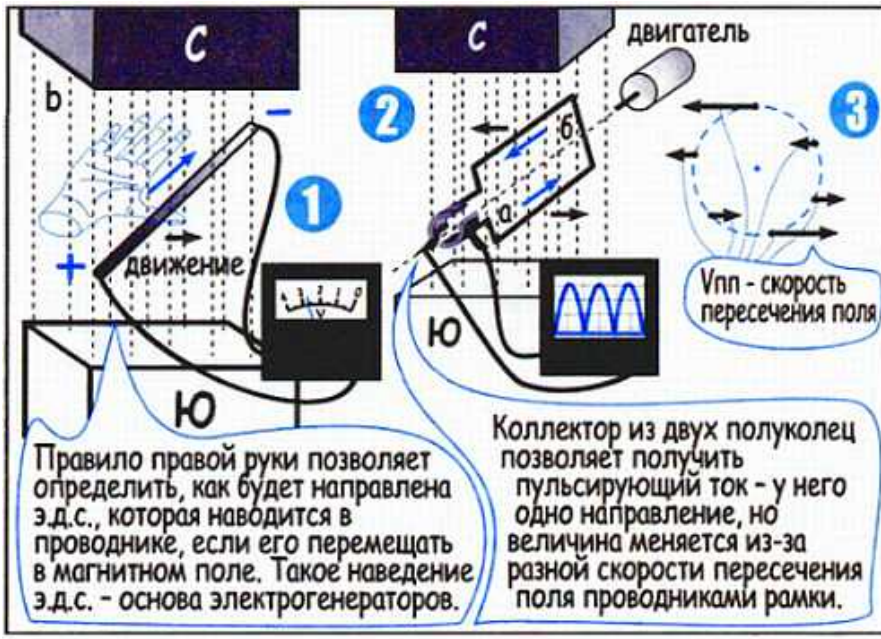
наводится э.д.с., когда она перемещается в магнитном поле и пересекает его (1), когда при тех же условиях поле перемещается относительно катушки (2) и когда катушка находится в магнитном поле, которое меняют каким-либо иным способом (3). Представьте себе, что в мощных генераторах чаще используют второй вариант (2), так как с катушки, которая находится в магнитном поле, снимают очень большую мощность, и её легче отвести от неподвижного объекта. А электромагниту, который создаёт магнитное поле, нужна во много раз меньшая мощность, и её не так уж сложно подвести к подвижному объекту.

Т-119. **График переменной электродвижущей силы показывает, как она меняется с течением времени.** Для начала повторим сказанное, но несколько по-другому. Двум э.д.с. (токам) разного направления, которые выдаёт генератор переменной электродвижущей силы (тока), названия «положительная э.д.с.» и «отрицательная э.д.с.» присвоены совершенно условно. Они должны лишь подчеркнуть, что меняется полярность генератора, его «плюс» и «минус» меняются местами. И одну из этих полярностей, часто совершенно безразлично какую, условно называют «положительной», вторую — «отрицательной». То же самое можно сказать о положительном и отрицательном токе — это просто токи разного направления, и опять же одному из них условно присвоено имя «положительный ток», другому — «отрицательный ток». Отсчёт отрицательной величины на графике, в частности отрицательной э.д.с., ведётся так же, как и положительной, от нулевого уровня, то есть от горизонтальной оси. Но для отрицательной величины (э.д.с., напряжение, ток) отсчёт идёт уже, естественно, вниз — чем больше отрицательная э.д.с., тем ниже от горизонтальной оси (ось времени) располагается соответствующая точка на графике. Мы уже в своё время говорили, что одно из направлений тока в проводнике мы совершенно условно назвали «положительным», а противоположное направление — «отрицательным». Точно так же условились называть «положительной» и «отрицательной» две разные полярности э.д.с. или напряжения (местонахождение их «плюса» и «минуса»). При этом график положительного тока (э.д.с., напряжения) договорились строить, как обычно, отсчитывая ток вверх от оси времени, а график отрицательного тока (э.д.с., напряжения) строить на этой же оси времени, но строить его, так сказать, «вверх ногами», то есть отсчитывая ток

(э.д.с., напряжение) вниз от оси времени. Можно было, конечно, договориться как-нибудь по-другому, например, делать два отдельных графика — для положительного и отрицательного тока (э.д.с., напряжения), а затем рассматривать их совместно, так сказать, положив рядом. Но весь мир согласился, что принятый вариант — один общий график и отрицательный ток ниже оси времени — проще и удобней всех других. Теперь все именно таким способом представляют на графике переменный ток, и мы, конечно, тоже поддержим эту договорённость.



ВК-147. *Аварийный режим — короткое замыкание, когда случайно возникает* $R_н = 0$ *и при этом недопустимо возрастают ток* I_2 *и ток* I_1. *В обмотках выделяется огромное количество тепла, трансформатор перегревается и быстро выходит из строя. Такой режим могут создать любые соседние витки, которые замкнулись из-за разрушения изоляции. Если не принять мер, то режим, близкий к короткому замыканию, создаст сердечник трансформатора, который представляет собой короткозамкнутый стальной виток.*


С
С
двигатель
b
2
3
1
движение
Vпп - скорость пересечения поля
Ю
Ю
Правило правой руки позволяет определить, как будет направлена э.д.с., которая наводится в проводнике, если его перемещать в магнитном поле. Такое наведение э.д.с. - основа электрогенераторов.
Коллектор из двух полуколец позволяет получить пульсирующий ток - у него одно направление, но величина меняется из-за разной скорости пересечения поля проводниками рамки.

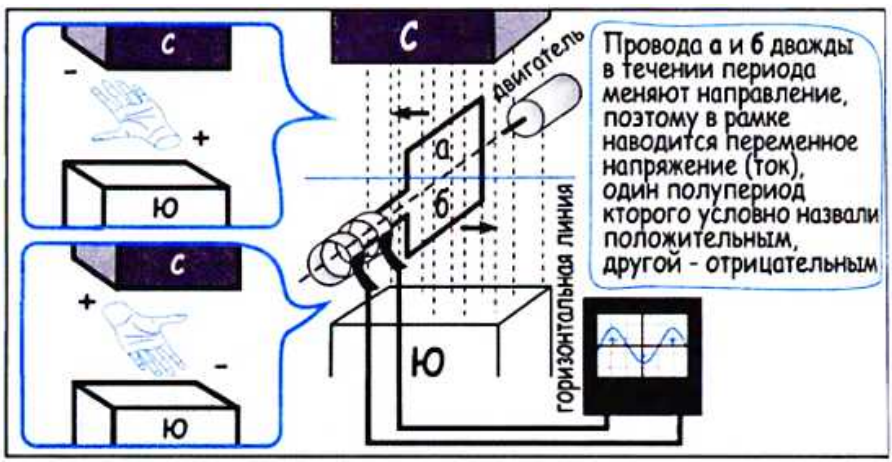
Р-55. ДВИГАЕМСЯ ПО ЗНАКОМОЙ ДОРОГЕ: ОТ РАМКИ «ДВИГАТЕЛЬ» К РАМКЕ «ГЕНЕРАТОР». Правило левой руки (Р-50) помогло нам разобраться с работой двигателя, определить направление, в котором внешнее магнитное поле двигает проводник с током. Точно так же правило правой руки (1 на этом рисунке) помогает разобраться с генератором — определить, как направлена наведённая в проводнике ЭДС, если мы двигаем этот проводник в магнитом поле. Правило правой руки утверждает, что, когда ладонь направлена в сторону северного полюса внешнего магнита и когда отогнутый большой палец указывает направление движения проводника, то вытянутые четыре пальца показывают направление э.д.с. (и тока при замкнутой цепи), наведённой в результате электромагнитной индукции. Сходство ситуаций в правилах левой руки и правой руки, а также общий главный герой — проводник, дают повод думать об обратимости электрических машин. Во многих случаях такая обратимость действительно существует — двигатель может работать генератором, генератор — двигателем. В надежде на обратимость и не меняя систему скользящих контактов, превратим рамку «ротор двигателя» в рамку «ротор генератора», вращая её для этого отдельным

двигателем (2). Осциллограф покажет, что мы не ошиблись, — на проводах, к которым раньше подключалась батарея питания двигателя, теперь действует напряжение, наведённое в результате электромагнитной индукции. В каком-то смысле это постоянное напряжение — оно, как и батарея, действует только в одном направлении, такова система переключения проводов a и Ь. Но по величине наведённое напряжение меняется — на разных участках своего пути провода рамки a и b с разной скоростью пересекают магнитное поле (3).

На рисунке Р-57 показан график переменной э.д.с. (тока), которая наводится в проводнике при его вращении в магнитном поле. Фактически в магнитном поле вращается рамка, при этом её работающие (горизонтальные) проводники всегда пересекают магнитное поле в разных направлениях, и в них наводится э.д.с. разной полярности. Но проводники рамки соединены последовательно (не забыли? аналогично двум гальваническим элементам в батарее), и обе наведённые на них э.д.с. складываются. Поэтому, рассматривая события в этом простейшем генераторе, можно для упрощения картины опять же считать, что в магнитном поле движется один проводник.

На графике Р-57.2 время, как обычно, отложено по горизонтальной оси (ось *x*), но отмеряется в новых для нас условных единицах времени — в градусах. Можно было, конечно, выбрать миллисекунды или микросекунды, но более удобны и к тому же приняты во всем мире градусы. Рамка совершает полный оборот за время в 360˚, в моменты 90˚ и 270˚ наведённая в ней э.д.с. достигает максимума, то есть своей амплитуды, в это время проводник с максимальной скоростью пересекает магнитное поле. Наконец, график рассказывает, что дважды за каждый оборот проводник движется не поперек поля, а вдоль и затем (пересекая условную горизонтальную линию) меняет направление, в котором он пересекал поле. В эти моменты — они соответствуют точкам (то есть моментам времени) 180˚ и 360˚ — э.д.с. равна нулю, и в эти же моменты происходит смена её полярности.

ВК-148. *Начнём с конца: стальной сердечник трансформатора перестаёт быть короткозамкнутым витком потому, что он изготовлен не из сплошного металла. Он собран из тонких стальных пластин, между которыми проложен слой изоляции. Ток первичной обмотки своим меняющимся магнитным полем, конечно, наводит ток в сердечнике, но в каждой пластине отдельно. При этом токи в соседних пластинах действуют друг против друга, практически ликвидируя короткозамкнутый стальной виток.*



Р-56. ВОЗВРАЩЕНИЕ К СТАРОЙ ОШИБКЕ ПРИНОСИТ В ИТОГЕ ОГРОМНЫЙ ВЫИГРЫШ. У нас есть

все основания порадоваться — в генератор был успешно превращён двигатель с системой токосъёма из двух полуколец для переключения проводов рамки. Теперь можно попробовать провести ещё более рискованный эксперимент — в генератор превратить двигатель, который вообще не мог работать, потому что в его системе питания вместе со скользящими контактами использовались целые кольца (Р-51). Правило правой руки показывает, что в этом случае токи (или э.д.с.,) наведённые в проводах а и б, пересекающих внешнее магнитное поле, всегда будут суммироваться. Но при этом одну половину оборота эти провода будут давать э.д.с. одного направления, другую половину оборота — противоположного. Одним словом, с забракованным в своё время кольцевым токосъёмом мы получили генератор, который создаёт, как её называют, переменную э.д.с., а в нагрузке, подключенной к рамке, переменный ток. Учитывая огромные его достоинства и то, что 97 % мировой электрической мощности производится в виде переменного тока, знакомству с ним мы будем уделять основное внимание. На этом же рисунке показан принцип построения простейшей векторной диаграммы из числа тех, которыми мы будем пользоваться в рассказах о переменном токе.

Т-220. **Под действием переменной э.д.с. в цепи идёт переменный ток, а на всех её участках действуют переменные напряжения**. Подключив нагрузку к нашему экспериментальному генератору переменной э.д.с., отметим: всё, что происходит в электрической цепи, подчиняется закону Ома. Поэтому когда увеличивается или уменьшается электродвижущая сила *Е*, то увеличивается или уменьшается ток, а если меняется полярность электродвижущей силы *Е*, то меняется направление тока. И также в полном соответствии с законом Ома (но уже для участка цепи, Т-71) переменный ток, проходя по какому-нибудь резистору, создаёт на нём переменное напряжение, а электродвижущая сила делится между участками последовательной цепи, создав на каждом из них определённое напряжение, или, иначе, падение напряжения (Р-31).

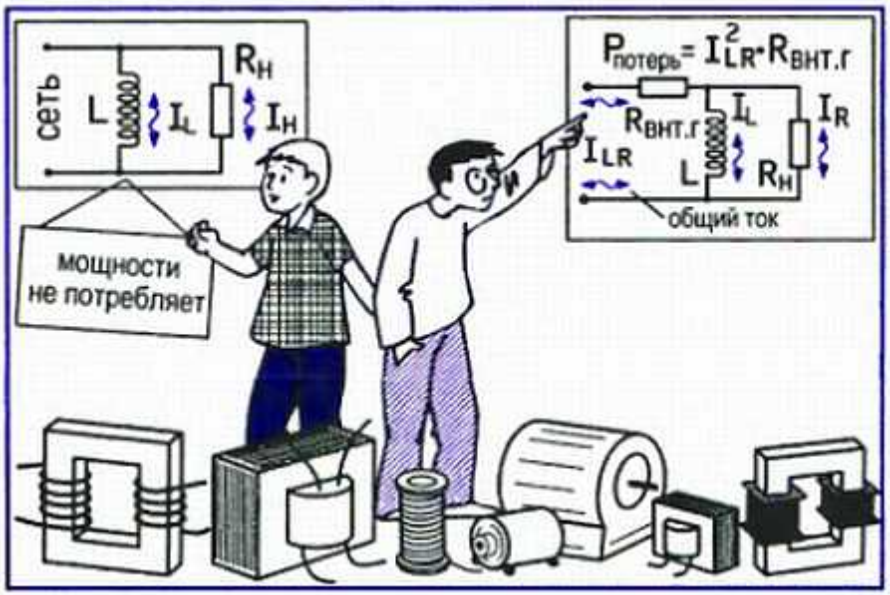
Переменный ток и переменные напряжения по пятам следуют за всеми изменениями э.д.с., и можно так подобрать масштаб, что график переменного тока и график переменного напряжения будут точной копией графика переменной электродвижущей силы

E. Очень часто кривую тока и кривую э.д.с., или напряжения, располагают на одном графике, сделав для этого две разметки вертикальной оси, — одну разметку в вольтах для э.д.с. и напряжения, другую разметку в амперах для тока. Рассматривая такой двойной график, нужно помнить, что это всего лишь экономия бумаги, и ничего больше. Нельзя, например, сравнивать высоту кривых э.д.с. и тока — они рассказывают о разных характеристиках процесса и отображаются в разных единицах измерения, каждая кривая начерчена в своём масштабе, и общая у них только ось времени.

Т-121. **Переменный ток может работать так же хорошо, как постоянный.** От того, что ток переменный, что заряды двигаются «то туда, то обратно», работоспособность этих зарядов во многих случаях ничуть не уменьшается. Они так же, как при однонаправленном, одностороннем движении, сталкиваются с атомами вещества, нагревают его, заставляют вещество светиться. И магнитное поле переменный ток создаёт не менее успешно, чем постоянный, только направление этого магнитного поля непрерывно меняется — как только сменится направление тока в катушке, так тут же поменяются местами северный и южный магнитные полюсы электромагнита. В некоторых случаях эту неприятность научились обходить, а во многих случаях смена магнитных полюсов вообще не имеет значения.

Вот пример. Электромагнит притягивает стальную деталь потому, что он своим полем намагничивает её, а затем тянет к себе, как он тянул бы к себе любой другой магнит. Если же в обмотке электромагнита протекает переменный ток, то вслед за изменением магнитного поля самого электромагнита мгновенно меняются местами магнитные полюсы стальной детали, и её притягивание не прекращается.

В тех же случаях, когда постоянный ток нельзя заменить переменным, можно использовать выпрямитель, который без особого труда переменное напряжение превратит в постоянное (Р-99), вполне заменяющее гальванический элемент или аккумулятор.



ВК-149. *Индуктивное сопротивление катушки* X_L *называют реактивным потому, что оно активной мощности не потребляет. Сколько возьмёт катушка для своего магнитного поля, столько же и отдаёт. Но так не получается в реальной жизни, где ток катушки* I_L *проходит по активному сопротивлению* $R_{внт}$*, куда входит внутреннее сопротивление генератора и ряд других сопротивлений большой сети. В этом сопротивлении* $R_{внт}$ *реактивный ток* I_L *теряет часть своей мощности, и эти потери приходится учитывать.*

Иногда, хорошо бы (но невозможно!) знать ток в любой момент его изменений
Э.Д.С., ток
17 октября 1911 года 15 ч. 17 мин. 23,0218 с.
17 октября 1911 года 15 ч. 17 мин. 23,0943 с.
17 октября 1911 года 15 ч. 17 мин. 23,1635 с.
1
t
время
Э.Д.С., ток
2
270°
0°
180°
360°
90°
t
время
Обычно изменения тока повторяются и достаточно знать эти изменения за один такой повторяющийся блок, который называют периодом. Для него введена единица измерения времени - один градус, а период разбит на 360 таких градусов.

Р-57. В ПОРЯДКЕ ПЕРВОГО ЗНАКОМСТВА ЗАМЕНЯЕМ СЕКУНДЫ НА ГРАДУСЫ. О переменном токе или напряжении очень хорошо рассказывает их график.

Но если сделать один такой полный график для какой-нибудь лампочки, которая включена уже несколько часов, то он наверняка растянется на несколько километров. Пользоваться таким графиком было бы не очень удобно. Кроме того, наш большой график переменного тока обычно всё время повторяется и рассказывает о событиях, очень похожих. Поэтому переменный ток принято отображать очень коротким графиком, на котором показан один полный цикл изменения тока (напряжения, э.д.с.), именуемый периодом. На таком коротком графике время принято отсчитывать не в привычных секундах, а в условных единицах времени — в градусах, каждый из них составляет 1/360 часть периода. Так что если такой типичный однопериодный график переменного тока начинается в нулевой точке 0° (момент времени 0 градусов) и ток нарастает, то в момент 90° он достигнет своей наибольшей величины — амплитуды. Затем, уменьшаясь, ток в момент 180° вновь станет равным нулю (как и в момент 0°) и начнёт нарастать, но уже сменив направление. Этот, как его называют, отрицательный ток отмеряют вниз от горизонтальной оси — от оси времени. Достигнув отрицательной амплитуды в момент 270°, ток завершит период своих изменений, уменьшившись до нуля в момент 360°. Время в градусах, соответствующее тому или иному значению тока (напряжения, э.д.с.) принято называть его фазой. Этот краткий комментарий, как и сам график, относится к наиболее распространённому синусоидальному току, который нам в дальнейшем предстоит часто вспоминать.

Т-122. **Приятно всё же встречать технические термины в виде слов родного языка: частота говорит о том, насколько часто повторяется полный цикл переменного тока**. Единица частоты — герц, Гц. О постоянном токе нам достаточно было знать одно — какова интенсивность движения зарядов, то есть то, что отражено в характеристике «величина тока», «сила тока». Переменный ток — явление значительно более сложное, чтобы судить о событиях в электрических цепях переменного тока, нужна более обширная информация. В частности, нужно знать, насколько быстро меняется ток, насколько часто происходит смена его направлений.

Об этом в равной мере хорошо говорят две характеристики.

Первая — период Г, он указывает время, в течение которого переменный ток (э.д.с., напряжение), изменяясь, проходит весь свой цикл, все свои возможные значения (Р-58).

Вторая характеристика — частота f (или F), она говорит о том, сколько периодов, то есть сколько полных циклов изменения тока (э.д.с., напряжения), успевает произойти за единицу времени. Единица частоты — герц, сокращённо Гц, ей дано имя великого физика Генриха Герца (1857–1894), открывшего, в частности, электромагнитные волны, на основе которых вскоре появились радио, телевидение, локация. Единица частоты 1 герц соответствует одному полному периоду в секунду. Если, например, частота составляет 2 Гц, то период длился 0,5 с, и, следовательно, за время 1 с переменный ток (э.д.с., напряжение) пройдёт 2 полных своих периода. Если же, например, время полного изменения переменного тока, то есть период T составляет 0,1 с, то за секунду будет 10 полных периодов, и частота составит 10 герц, 10 Гц). Ясно, что чем медленнее происходят изменения тока, чем дольше длится период, тем меньше (принято говорить «ниже») частота. И наоборот, с увеличением частоты период становится всё более коротким.

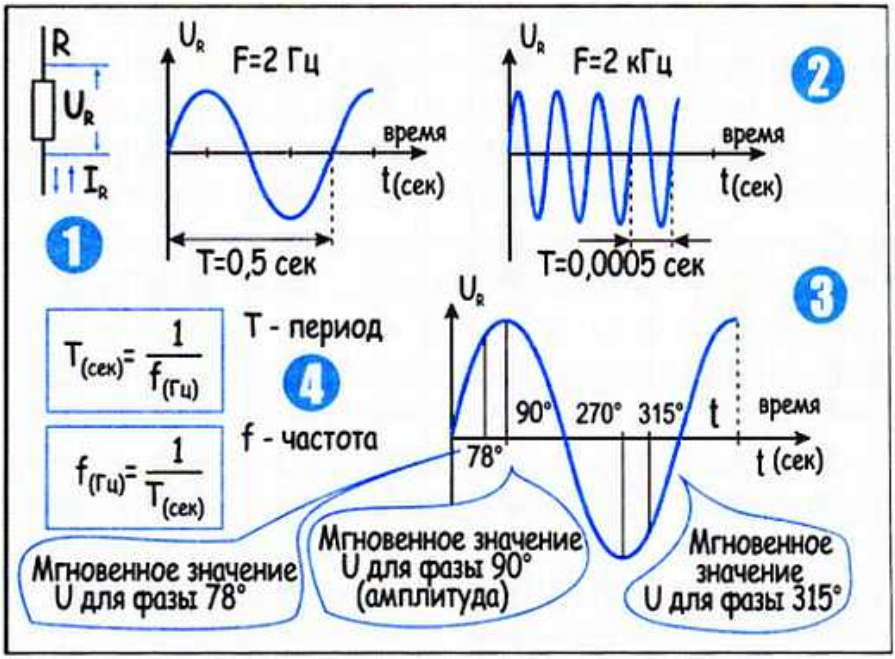
Т-123. **«Мгновенное значение» и «амплитуда» сообщают о работоспособности переменного тока в какой-то определённый момент**. С постоянным током было просто: чтобы представить себе ток в цепи, достаточно было знать одну цифру. А вот что делать, если потребуется указать величину переменного тока? Какую цифру называть? Ток ведь переменный, величина его непрерывно меняется, в какой-то момент по проводнику идёт очень много свободных зарядов, в другой момент очень мало, в третий ни одного.

Можно указать силу тока и отметить, что она наблюдалась именно в такой-то момент. Например, так: «29 мая 1987 года в 18 часов 37 минут 26,57854 секунды ток в цепи был равен 5 ампер». Это будет мгновенное значение тока, ток в данный момент, в данное мгновение. Характеристика не очень удобная — нельзя же каждую микросекунду замерять ток, чтобы составить его подробное жизнеописание (Т-8).

Можно назвать наибольшее значение тока (э.д.с., напряжения), тот максимум, которого он достигает дважды за период. Кстати, наибольший ток (э.д.с., напряжение) во время положительного и отрицательного полупериода называют положительной и отрицательной амплитудой тока. Это уже вполне приемлемая характеристика, по крайней мере, не меняющаяся каждое мгновение, жаль только, рассказывает она о довольно редких событиях: амплитудный ток появляется на

неуловимо короткое мгновение всего два раза за период. А всё остальное время переменный ток (э.д.с., напряжение) меньше амплитуды, так что на неё никак нельзя рассчитывать, думая, например, о работоспособности генератора.

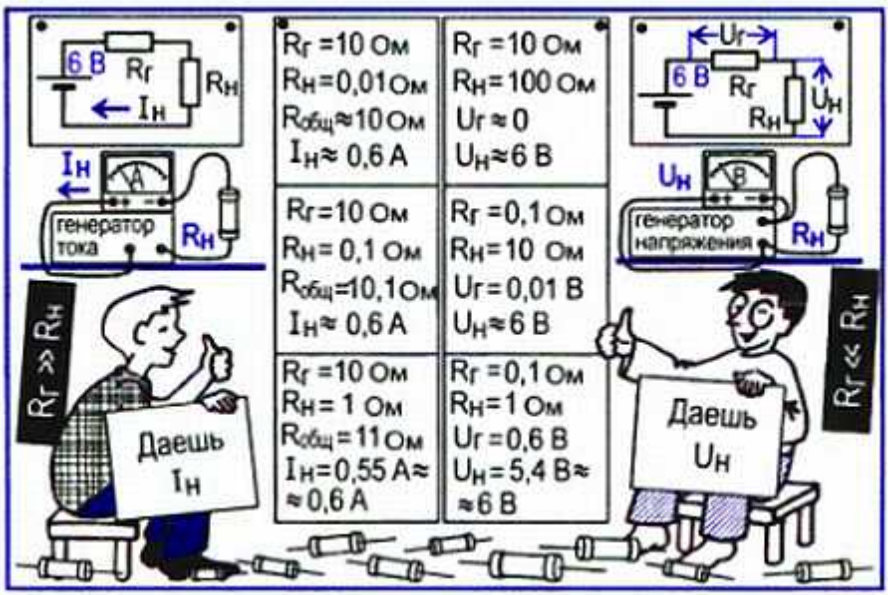
ВК-150. *На большом заводе тысячи двигателей и трансформаторов, каждый со своими катушками. При этом потери в* $R_{внт}$ *из-за индуктивной составляющей общего тока (ВК-149) могут быть значительными. Коэффициент мощности (косинус фи)* $\cos \varphi$ *помогает как-то оценить эти потери и снизить их. Если, например,* $\cos \varphi = 0{,}7$*, то, значит, общие потери довольно велики. А если* $\cos \varphi$ *увеличился до 0,9, то, значит, оборудование используется лучше, и при этом общие потери намного меньше.*



Р-58. ПЕРВЫЕ СТРОКИ АНКЕТЫ. Основные характеристики переменного тока — это его период **T** и частота **f**. Период **T** в традиционных единицах времени, например в секундах, говорит о том, сколько длится один полный цикл переменного тока, то есть указывает время, в течение которого переменный ток один раз проходит все свои возможные значения. Частота **f** говорит о том, сколько периодов приходится на время в одну секунду. Совершенно ясно, что чем больше частота, тем больше периодов успевает пройти за секунду, тем меньше времени приходится на один период.

Т-124. **Для того чтобы оценить работоспособность переменного тока в среднем за длительное время, для него придумана характеристика «эффективное значение».** Есть довольно простой способ судить о том, что может сделать переменный ток не в какой-то «данный момент», не в моменты своего регулярно повторяющегося рекорда (амплитуда), а в среднем за длительное время. Для этого удобно сравнить действие данного переменного тока с действием постоянного тока. Пропустим, например, через лампочку переменный ток и через такую же точно лампочку пропустим постоянный ток. Подберём величину этого постоянного тока так, чтобы обе

лампочки светились одинаково, это означает, что оба тока — постоянный и переменный — производят одинаковую работу. Величину постоянного тока, который по своей работоспособности эквивалентен какому-то определённому переменному току, называют эффективным значением этого переменного тока. Точно так же эффективное значение переменного напряжения (э.д.с.) — это некое постоянное напряжение (э.д.с.) с такой же работоспособностью, эквивалент данного переменного тока, как говорится, по деловым качествам.

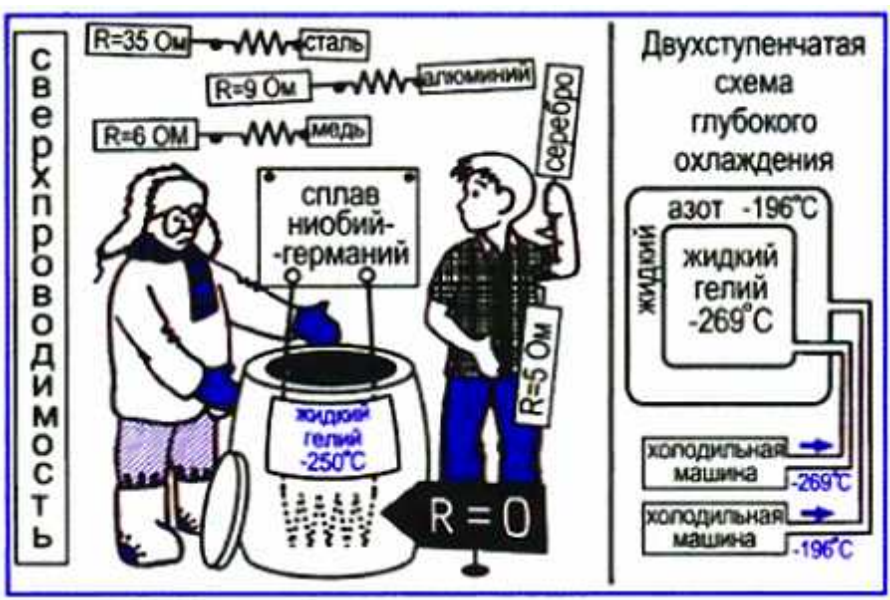


ВК-151. *Генератор тока» и «генератор напряжения» — это два генератора со своими особенностями схемы. У первого внутреннее сопротивление намного меньше, чем у предполагаемой нагрузки, у второго намного больше. Поэтому к генератору напряжения можно подключать разную нагрузку и получать одинаковое напряжение. Аналогично генератор тока при нагрузке с разным сопротивлением создаст одинаковый ток.*

При прочих равных условиях эффективный ток (э.д.с., напряжение) тем больше, чем больше амплитуда переменного. А иначе и быть не может — атлет, который на соревнованиях поднял штангу в 200 килограммов, за день наверняка сумеет перенести больше грузов, чем малыш, личный рекорд которого — табуретка. Для переменной э.д.с. (напряжения, тока), которая наводится во вращающейся рамке, существует такое соотношение: эффективное значение составляет примерно 0,7 (то

есть 70 %) от амплитуды, а амплитуда, соответственно, в 1,4 раза (на 40 %) больше эффективного значения (Р-59). Эти же соотношения действительны и для обычного сетевого напряжения, которое, в частности, поступает в наши дома. Так, например, в сети с переменным напряжением 127 В (для напряжения сети, так же как для всех электроприборов, всегда указывают именно эффективное напряжение) амплитуда составляет 127 В 1,4 = 180 В, а в сети 220 В амплитуда напряжения 220 В -1,4 = 308 В.

Ещё раз отметим: для всех электрических приборов и аппаратов — от утюга до мощного электродвигателя — в инструкциях, техническом паспорте, на корпусе самого прибора указывают именно эффективное напряжение, которое нужно для нормальной работы. Так, если на лампочке или возле сетевого разъёма электробритвы написано 220 В, то имеется в виду именно эффективное напряжение. Однако и про амплитуду иногда вспоминать необходимо — как-никак она почти в полтора раза больше эффективного напряжения или эффективного тока. И когда, например, вы хотите включить в цепь переменного тока конденсатор, то нужно следить, чтобы амплитуда напряжения на этом конденсаторе не превысила допустимое для него рабочее напряжение. Точно так же именно амплитуду напряжения нужно иметь в виду, сверяясь с правилами электрической безопасности (Т-10).

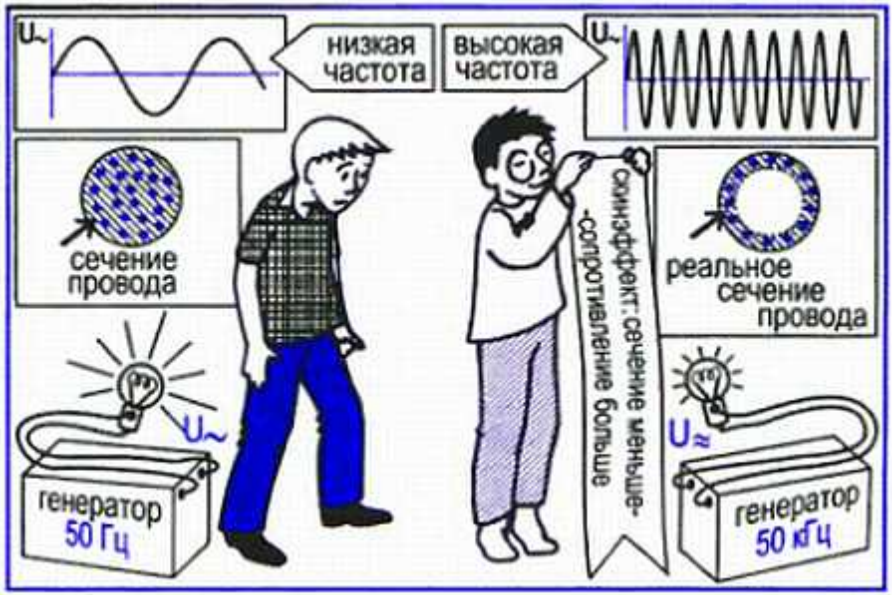


ВК-152. *В районе температуры жидкого гелия (около 4*

градусов Кельвина, или минус 269 градусов Цельсия) некоторые металлы и сплавы полностью теряют своё электрическое сопротивление, становятся сверхпроводниками. Подобное охлаждение пока настолько дорого, что сверхпроводники используют лишь в исключительных случаях, например в больших ускорителях. При этом проводят предварительное охлаждение до минус 77 градусов Цельсия в значительно более дешёвом жидком азоте.

И последнее, в порядке повторения пройденного, — с этого мы начали разговор о соотношении амплитуды переменного тока (э.д.с., напряжения) и его эффективного значения. Мы установили, что эффективное значение переменного тока (э.д.с., напряжения) на 30 % меньше его амплитуды, то есть $\mathbf{I}_{эф} = 0{,}7 \cdot \mathbf{I}_{АМП}$. Соответственно, амплитуду переменного тока (э.д.с., напряжения) всегда легко подсчитать, так как она (амплитуда) примерно на 40 % больше эффективного тока, то есть $\mathbf{I}_{АМП} = 1{,}4 \cdot \mathbf{I}_{эф}$. Так вот, эти коэффициенты 0,7 и 1,4 действительны только для тока (э.д.с., напряжения), который меняется по хорошо известному математикам графику с названием «синусоида». Для всех токов (э.д.с., напряжений), которые меняются по-иному (Р-60), эти коэффициенты могут быть совершенно другими. Об этом, как уже было обещано, вскоре будет рассказано более подробно.

Т-125. **Фазу и сдвиг фаз надо бы указывать, называя точное время, причём его принято указывать не в секундах, а в градусах**. В серьёзной литературе и в популярной, в некоторых заводских документах, да и просто в разговоре профессионалов нередко встречаются термины «фаза» и «сдвиг фаз». Рядовые пользователи электрической техники, как правило, не очень чётко представляют, о чём конкретно говорят эти слова, хотя, если разобраться, ничего такого сложного нет в понятиях «фаза» и «сдвиг фаз». Можно сказать, что фаза — это такой параметр переменного тока, который указывает, в какой именно момент времени этот переменный ток (э.д.с., напряжение) имеет то или иное мгновенное значение. Поэтому, указывая фазу, мы должны были бы, например, говорить так: «У мгновенного значения тока 5 А фаза была такая — 18 часов 37 минут 26,57854 секунды 19 декабря 1997 года» или «У этой положительной амплитуды фаза была 3 часа 17 минут 6,35532 секунды 19 декабря 2002 года».



ВК-153. *При увеличении частоты переменного тока растёт сопротивление проводника, по которому идёт ток. Это явление названо «поверхностный эффект», или «скин-эффект», связано оно с магнитными полями, оттесняющими ток к поверхности провода. В радиотехнике, чтобы ослабить этот неприятный эффект, поверхность провода покрывают серебром. Или используют многожильный провод литцендрат, имеющий значительно большую, чем у одножильного провода, поверхность при том же общем диаметре.*

Конечно, вести отсчёт от начала нашей эры и определять фазу по секундомеру не очень-то удобно. И главное, не нужно. Как правило, вполне достаточно вести отсчёт фазы от какого-либо условного момента времени, скажем, от начала периода, например от того момента, когда переменный ток проходит через ноль и начинает новый цикл своих изменений. И отсчитывать фазу удобно не в секундах, а в долях периода. Тогда фазу можно было бы, например, указывать так: «У мгновенного значения тока 5 А фаза — 5 % всего периода, если отсчитывать от его начала». Или так: «Из графика легко заметить, что фаза положительной амплитуды тока составляет 25 % периода, или, иначе, 1/4 периода, фаза отрицательной амплитуды — 75 % периода, или 3/4 периода, а фазы нулевых значений тока составляют 0, 50 и 100 % от длительности целого периода».

Фазу принято отмерять именно так, но только не в процентах (1/100 часть периода), а в более мелких единицах — в градусах,

которых кое-кто почему-то очень боится. Принято, что градус составляет 1/360 часть периода, и целый период таким образом — это 360 градусов, половина периода (полупериод) — 180 градусов и четверть периода — 90 градусов. И что тут страшного? Чего бояться?

Само слово «градус» в переводе с латыни значит «шаг, ступень». В градусах измеряют температуру, угол и вот теперь ещё и время. Название во всех случаях одно и то же — градус, — а единицы измерения совершенно разные. Это, конечно, очень неудобно, когда одним и тем же словом называют разные характеристики, понятия, предметы, с таким неудобством, к сожалению, встречаешься нередко. Для отсчёта доли периода градус, скорее всего, выбрали потому, что переменную э.д.с. можно получать, вращая проводник в магнитном поле, и на один полный оборот, то есть на 360 угловых градусов, как раз приходится полный период T переменного тока (напряжения, э.д.с.).

Параметр «фаза» очень важен, а часто и необходим, например, в тех случаях, когда в цепи действуют несколько переменных э.д.с. Чтобы оценить результаты такого взаимодействия, нужно знать, как сдвинуты фазы этих э.д.с. Иногда фазу приходится учитывать ещё и потому, что в цепи не совпадают по времени, то есть сдвинуты по фазе, напряжение и ток. В цепях переменного тока и такое возможно.

ВК-154. *Скин-эффект давно и широко используется в*

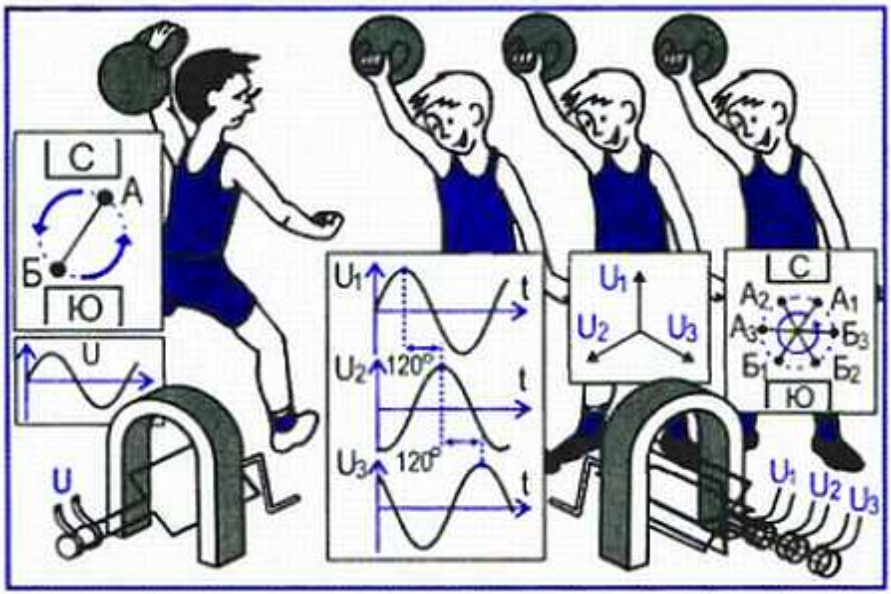
индустрии для поверхностной закалки некоторых изделий из стали или её сплавов. Есть детали, у которых очень важно иметь твёрдую износостойкую поверхность, и при этом их центральная часть должна оставаться не закалённой. Такая структура обеспечивает высокую прочность и долговечность при больших нагрузках. Поверхностная закалка позволяет получить нужную структуру валов, шестерён, элементов подшипников и многих других деталей.

Т-126. **Активное сопротивление: ток и напряжение совпадают по фазе**. Примером активного сопротивления может служить обычная электрическая лампочка. А вообще активным называют сопротивление, если оно уменьшает ток в цепи, препятствует движению зарядов и одновременно (это нужно отметить обязательно!) отбирает у них часть мощности.

Но разве бывает иначе? Разве может какой-либо элемент цепи препятствовать, мешать электрическому току и в то же время не отбирать у него энергию? Оказывается, может. Понятие активное сопротивление понадобилось именно потому, что есть элементы электрических цепей, которые оказывают сопротивление переменному току, но мощности при этом не отбирают. О таких элементах говорят, что у них реактивное сопротивление.

События на участке с активным сопротивлением беспрекословно подчиняются закону Ома в том виде, в каком он был установлен для постоянного тока. Поэтому и максимум тока наблюдается точно в тот же момент, что и максимум напряжения, то есть между током и напряжением нет никакого сдвига фаз.

Т-127. Под действием переменного напряжения через катушку индуктивности идёт переменный ток. Тот факт, что по катушке индуктивности пойдёт переменный ток, если подвести к ней переменное напряжение, не вызывает никаких сомнений — на катушку намотан металлический провод, а ток идёт по любому проводнику. В подтверждение мы можем показать, как через катушку идёт постоянный ток, например, от гальванического элемента. Однако то, что происходит в цепи катушки при переменном токе, определяется не только сопротивлением проводника, из которого эта катушка изготовлена. Потому что под действием переменного тока катушка будет создавать переменное магнитное поле, в ней будет наводиться э.д.с. самоиндукции и начнутся непростые процессы, в которых мы сможем разобраться чуть позже. А сейчас разберёмся в непростых процессах, которые происходят при подключении конденсатора к источнику переменного напряжения.



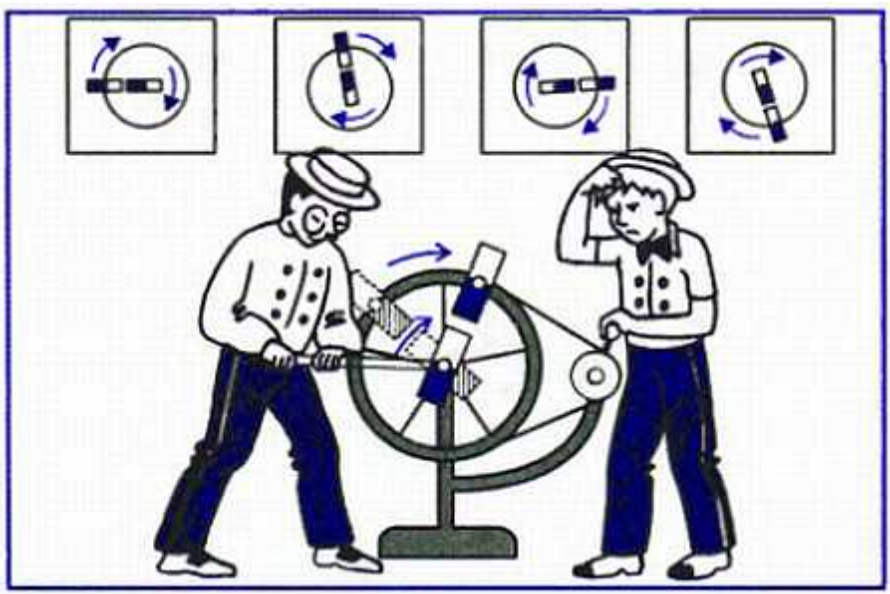
ВК-155. *Электрическая энергия поставляется потребителям в виде трёхфазного напряжения. Его источник можно представить себе как генератор, где в магнитном поле вращаются три рамки, сдвинутые на угол 120 градусов. В результате генерируются три ЭДС, которые появляются со сдвигом во времени на 1/3 часть периода, то есть на 120 градусов. В целом три такие рамки дают в три раза большую мощность, чем одна, но для их вращения, естественно, нужна в три раза большая мощность двигателя.*

Т-128. **Под действием переменного напряжения в цепи конденсатора идёт переменный ток.** Постоянный ток через конденсатор не проходит — в диэлектрике практически нет свободных зарядов, которые могли бы создавать ток, включение конденсатора в цепь постоянного тока равносильно разрыву этой цепи. Однако в момент, когда конденсатор заряжается или разряжается, ток в цепи идёт — заряды идут к обкладкам или уходят с них. И такое движение зарядов будет происходить в цепи не только при включении-выключении, но и при любом изменении напряжения на конденсаторе. Увеличится напряжение — пойдут на обкладки дополнительные заряды и на какое-то мгновение появится зарядный ток в цепи. Уменьшится напряжение — и часть зарядов уйдёт с обкладок, появится кратковременный разрядный ток, то есть ток обратного направления.

Нетрудно представить себе, что произойдёт, если подвести к конденсатору переменное напряжение. Поскольку напряжение

непрерывно меняется, то конденсатор будет непрерывно заряжаться и разряжаться, а значит, в цепи конденсатора будет непрерывно идти ток. Через диэлектрик заряды, как всегда, не проходят, они лишь двигаются к обкладкам конденсатора (напряжение на конденсаторе растёт, конденсатор заряжается) или с обкладок (напряжение на конденсаторе падает, конденсатор разряжается). Это движение зарядов как раз и есть переменный ток в цепи конденсатора.

На рисунке Р-61 показан график такого переменного тока, видно, что он сдвинут по фазе относительно напряжения на конденсаторе, но при этом график тока имеет ту же форму (у графика такого вида есть собственное имя — «синусоидальный»), что и график самого напряжения. То, что всё получается именно так, требует некоторых пояснений.

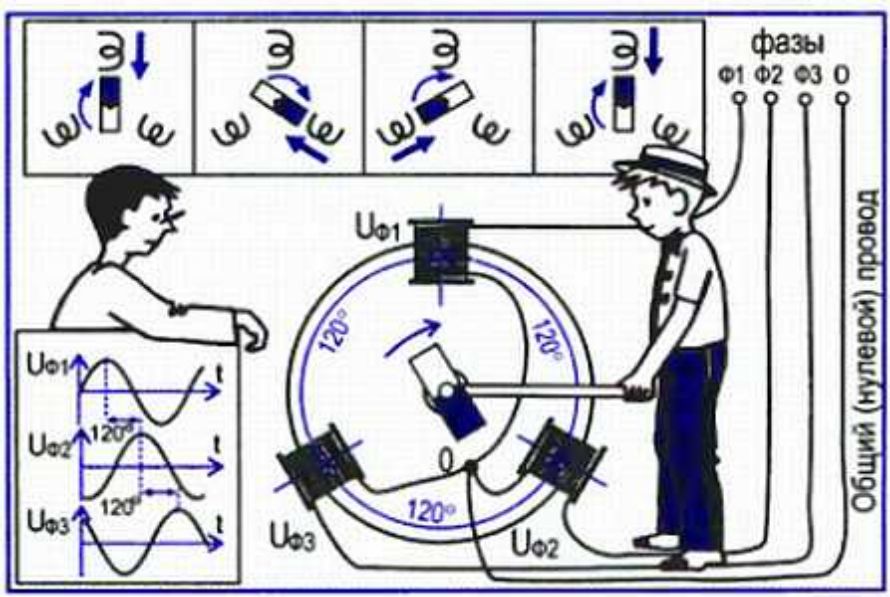


ВК-156. *Если вращать магнит по кругу, то он, притягивая другой магнит, заставит и его вращаться вместе с собой. Об этом можно сказать и иными словами, более близкими к тому, что нам покажет следующий рисунок: вращаясь по кругу, магнит создаст вращающееся магнитное поле, которое заставит вращаться находящиеся в нём намагниченные предметы.*

Т-129. **Замечательная математическая кривая синусоида была получена древними математиками, как результат несложных геометрических построений**. В мире происходит бессчётное множество естественных и искусственных процессов, в

которых одни какие-нибудь величины зависят от других каких-нибудь величин. Температура звезды зависит от плотности её вещества, вес зайца — от количества съеденной им травы, скорость автомобиля — от количества сжигаемого бензина, ток в цепи — от э.д.с. генератора и так далее. Зависимости эти бывают самые разные, в том числе описываемые очень простыми уравнениями и чрезвычайно сложными, которые, в свою очередь, могут быть представлены простыми или сложными графиками (Р-60).

Среди возможных зависимостей одной величины от другой особое место занимает та, которую мы называем «синусоидальная зависимость». Она была открыта очень давно при исследовании некоторых геометрических построений, но потом оказалось, что такая же синусоидальная зависимость наблюдается у самых различных природных явлений.



ВК-157. *Равномерно расставим вдоль окружности три электромагнита и к каждому из них от системы трёхфазного тока подведём одно фазовое напряжение — они следуют друг за другом, и 50 раз в секунду их магнитное поле будет проходить полный круг. Это вращающееся магнитное поле могло бы крутить магнит в центре круга, но в реальном двигателе вместо магнита работает электромагнит, ток в котором наводят (а значит, и магнитное поле создают) сами три электромагнита, расположенных в статоре по кругу.*

Думая о происхождении синусоиды, можно мобилизовать фантазию и представить себе, как неизвестный древний математик, отдыхая от своих размышлений о мирах где-то на берегу моря, нарисовал на песке круг, провёл через центр две перпендикулярные оси и, наконец, изобразил главную работающую деталь рисунка — радиус *R* своего круга.

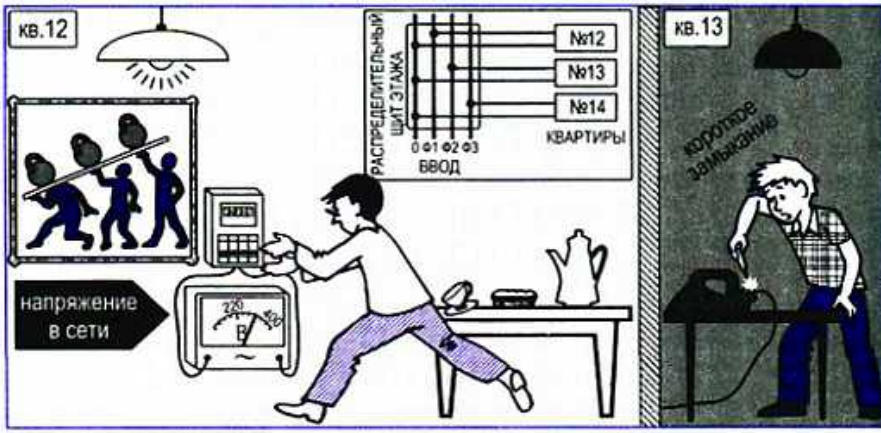
Всё это была лишь подготовка к главному действию, которое, возможно, производилось из чистого любопытства. Действие состояло в том, что математик менял на рисунке положение радиуса *R*, как бы вращал его, и при этом выполнял два измерения — сначала измерял угол а между самим радиусом *R* и горизонтальной осью, а затем измерял длину линии *M*, которую он назвал линией синуса, — это был перпендикуляр, опущенный на горизонтальную ось из точки, где радиус *R* упирается в круг. Название «линия синуса» появилось, видимо, потому, что в переводе с латыни «синус» означает «дуга», а линия *M* находится рядом с дугой, на которую как бы смотрит угол а, с которого начинаются все измерения.

Итак, неизвестный нам древний математик вращает радиус на своей нехитрой геометрической конструкции, измеряет угол *α* (то есть угол наклона радиуса *R*) и записывает его в таблицу. Затем он сразу же измеряет соответствующую этому углу *α* длину линии M, то есть длину линии синуса, и результат тоже вносит в таблицу. В таблицу, правда, для удобства вносится не сама длина линии *M*, в таблицу вносится её отношение к радиусу, то есть *M/R* — число, которое показывает, какую часть радиуса *R* составляет *M*. Для угла 90 градусов, например, это соотношение равно единице, поскольку *M* полностью совпадает с радиусом *R*, они равны, то есть $M = R$ и, значит, $M/R = 1$. Коротко это записывают так: $sin\ 90^\circ = 1$. Для угла 45° отношение *M/R* примерно равно 0,7, для угла 30° отношение $M/R = 0{,}5$, то есть $sin\ 45^\circ = 0{,}7$ и $sin\ 30^\circ = 0{,}5$.

Наш математик нашёл значение *M/R* для всех углов *α* — от 0 до 360 градусов — и все результаты свёл в таблицу, которая успешно добралась до нынешних справочников и по которой всегда можно найти значение sin a для нужного угла *α*.

Попробуем подвести итоги своего путешествия в далёкое прошлое. Если где-нибудь встречаются две величины, связанные обозначением *sin*, то это значит, что одна из величин зависит от другой точно так же, как длина линии синуса *M* зависит от угла *α* в известном круге неизвестного математического гения. Хотите знать, как именно зависит? Посмотрите в таблицу на рисунке Р-67 (в полном виде её, как уже говорилось, можно найти в справочнике) или на построенный на её основе график на этом же

рисунке.



ВК-158. *В трёхфазной системе крайне опасна повышенная нагрузка одной из фаз, а короткое замыкание в ней может привести к трагическим последствиям. При повышенной нагрузке в какой-либо фазе (тем более при коротком замыкании в ней) сильно возрастает напряжение в других фазах, и оно может стать опасным для включённых в сеть приборов. В каждом участке потребления есть предохранитель, отключающий в подобном случае линию электропитания, но знать о возможной опасности тоже полезно.*

Т-130. **Родившаяся из чисто геометрических построений синусоида, как оказалось, описывает много самых разных процессов, в том числе электрических**. Зависимость, о которой рассказывают график и таблица на рисунке Р-67, как уже было отмечено, называется синусоидальной, или, иначе, гармонической зависимостью, а сама кривая на графике — синусоидой. Таблица и график — это своего рода рабочий инструмент, а обозначение *sin* — обычное математическое указание к действию. Когда мы видим запись $\mathbf{A} = \mathbf{B}^2$, то знаем: чтобы найти *A*, нужно *B* возвести в квадрат, то есть провести простое умножение $\mathbf{A} = \mathbf{B}^2 = \mathbf{B}\cdot\mathbf{B}$. Когда написано $\mathbf{A} = \mathbf{B}/\mathbf{C}$, то *A* находят, разделив *B* на *C*. Когда же написано $\mathbf{A} = \mathbf{B}\cdot sin\ 60^\circ$, то для вычисления *A* нужно найти в таблице значение *sin* α для угла $\boldsymbol{\alpha} = 60^\circ$ и умножить *B* на найденную в таблице величину.

Можно, конечно, нарисовать много кривых, похожих на синусоиду, но синусоидой называется только одна (Р-60). Именно та, которая в точности соответствует таблице на рисунке Р-67. О замечательных особенностях синусоиды, о том, почему она оказалась столь универсальной, надо бы рассказать отдельно и

подробнее. Но это уже когда-нибудь потом. Сейчас достаточно сказать, что в точности по синусоидальному сценарию протекает огромное множество природных процессов. По синусоиде, в частности, меняется энергия звуковой волны, скорость движения маятника, отклонение колеблющейся струны, изменение магнитного и электрического полей в радиоволне. Даже изменение численности зайцев в каком-либо регионе тоже очень напоминает синусоиду.

Для нас особо важно, что по закону синуса меняется скорость, с которой равномерно вращающиеся проводник или рамка из двух проводников пересекают магнитное поле. Поэтому в таком простейшем генераторе наводится синусоидальная — именно синусоидальная! — электродвижущая сила, а при подключении к нему нагрузки в цепи идёт синусоидальный ток.

Практически во всех генераторах переменного тока, от небольших, в бортовой сети автомобиля, до самых мощных генераторов на электростанциях, питающих электроэнергией города и страны, везде э.д.с. получают, вращая систему проводов в магнитном поле. Поэтому везде эта э.д.с. получается синусоидальной, и все потребители электроэнергии получают именно синусоидальное переменное напряжение в свои дома или на заводы. Правда, для некоторых транспортных машин, в частности для электропоездов и трамваев, переменное синусоидальное напряжение потом преобразуют в постоянное, но это уже совсем другая история.

Особый интерес представляет одна исключительно важная особенность синусоидальной зависимости, которую нетрудно заметить, если всмотреться в её график, особенно на рисунке Р-60.

Т-131. **Скорость изменения синусоидального напряжения (э.д.с., тока) также изменяется по синусоидальному закону**. В своё время мы обратили особое внимание на то, что в ряде случаев важна не абсолютная величина чего-либо (объёма воды, пройденного пути, тока), а скорость её изменения. Подтверждение этой истины в цепях переменного тока можно встретить на каждом шагу, и для синусоидальных процессов она приобретает особое значение. Чтобы увидеть это, давайте для начала посмотрим, чему равна скорость изменения переменного синусоидального напряжения U (напряжение выбрано в качестве примера, то же самое можно было бы сказать о токе или э.д.с.).

Синусоидальное напряжение U в разные моменты меняется с разной скоростью. Иногда график этого напряжения идёт вверх или вниз круто — напряжение меняется резко, быстро. Иногда график сравнительно пологий — напряжение меняется вяло,

медленно. Скорость изменения считается положительной, если напряжение меняется в сторону положительной амплитуды, а если оно движется в сторону отрицательной амплитуды — скорость отрицательная. Если измерять скорость изменения синусоиды и построить график изменения этой скорости, то окажется, что это тоже синусоида, но сдвинутая по фазе на четверть периода, то есть на 90 градусов (Р-60.5). Если подобным образом исследовать любые другие переменные напряжения (несколько примеров на рисунках Р-60.1, Р-60.2, Р-60.3, Р-60.4), то ничего подобного мы не обнаружим — синусоида единственная в своём роде.

То, что мы установили для синусоидального напряжения (ещё раз повторим — скорость его изменения меняется по такому же синусоидальному закону, как и само напряжение), относится к любому другому процессу, график которого синусоида, в частности, к синусоидальному току, отклонению маятника, колебаниям струны, изменению электрического поля в световой волне и многим другим. Обнаруженная одинаковость графиков синусоидального напряжения и скорости его изменения приводит к исключительно важным последствиям.

Глава 11
Ожидаемые неожиданности

Мы подключили к источнику переменного напряжения конденсатор и, как выяснилось чуть выше, в цепи конденсатора пошёл переменный ток. Казалось бы, если последовательно с конденсатором включить катушку, то она как-то увеличит общее сопротивление и ток в цепи уменьшится. В действительности может случиться так, что ток не только не уменьшится, но даже возрастёт, привлекая наш внимание к удивительным особенностям цепей переменного тока. В них происходит много такого, чего не было в цепях постоянного тока: непрерывно меняется уровень и направление питающего напряжения, непрерывно сменяют друг друга зарядный и разрядный токи в цепи конденсатора, непрерывно меняется магнитное поле катушки, а значит, в ней наводится э.д.с. Всё это вполне может давать какие-то новые, пока неожиданные для нас эффекты.

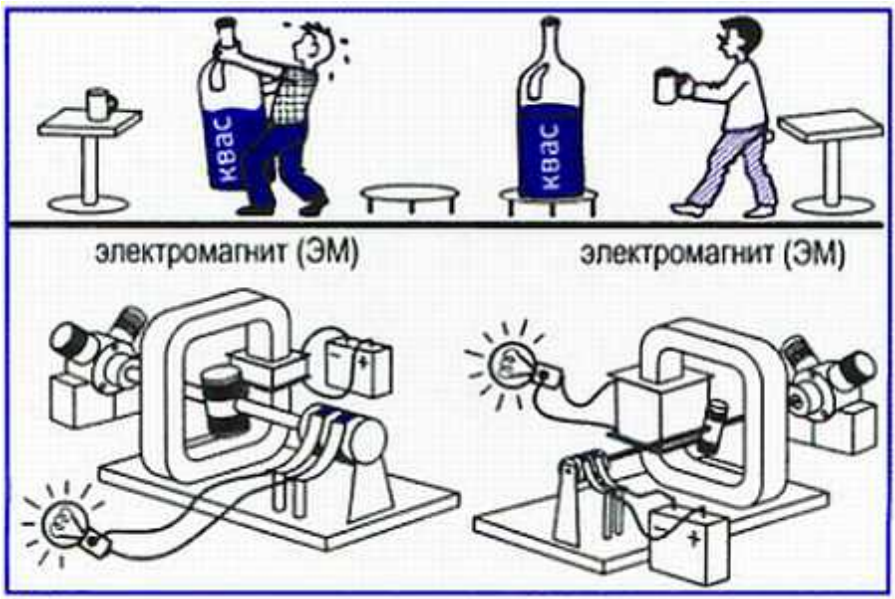
***Т-132*. Синусоидальное напряжение создаёт синусоидальный ток через конденсатор; ток опережает напряжение (или, иначе, напряжение отстаёт от тока) на 90 градусов**. Для начала попробуем постепенно менять постоянное напряжение на конденсаторе, подключив его к делителю напряжения. Мы уже знаем, что в момент, когда напряжение на конденсаторе меняется, в его цепи идёт зарядный либо разрядный ток — избыточные заряды двигаются к обкладкам либо уходят с них. Чем резче, чем быстрее мы меняем напряжение на конденсаторе, тем больше эти токи, что вполне объяснимо. Если взять конденсатор ёмкостью 1 Ф и изменить на нём напряжение на 1 В, то на обкладках накопится лишний кулон зарядов — 1 К, это следует из самого определения единицы ёмкости фарад. В случае если менять напряжение быстро и если, скажем, заряд 1 К перейдёт на обкладки за 0,1 с, то средний ток составит 10 А. А если менять напряжение на конденсаторе медленнее, если, например, увеличить напряжение на 1 В за 10 с, то зарядный ток будет значительно меньше и составит лишь 0,1 А.

Теперь мы можем, несколько опережая главные события, предварительно взглянуть на рисунок Р-61. Напряжение, действующее на конденсаторе, всё время меняется и создаёт ток в

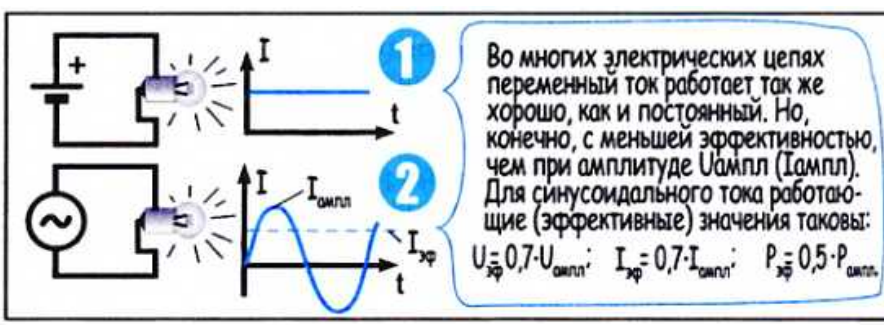
цепи — то зарядный, то разрядный. Это заряды периодически то приходят на обкладки конденсатора, то уходят с них. Наибольший ток будет в те моменты, когда напряжение меняется с максимальной скоростью, то есть когда оно проходит через ноль (в частности, фаза 180°). Во время амплитуды напряжения (фазы 90° и 270°) ток в цепи равен нулю — какое-то неуловимое мгновение напряжение как бы не меняется, оно уже перестало расти, но ещё не начало уменьшаться. Когда напряжение растёт (приближается к положительной амплитуде), мы считаем ток положительным. Когда напряжение падает (изменяется в сторону отрицательной амплитуды), направление тока меняется на обратное, и мы называем это направление отрицательным.

Подведём итог, он очень важен и прост. Если на конденсатор подано синусоидальное напряжение U_C, то скорость его изменения тоже синусоида, и поэтому в цепи течёт синусоидальный ток I_C. Но скорость и само напряжение сдвинуты по фазе на 90 градусов, и поэтому такой же фазовый сдвиг существует между напряжением на конденсаторе и током в его цепи. Конкретно, меняясь так же, как скорость изменения U_C, ток опережает напряжение на 90 градусов — на четверть периода. Или, что то же самое, напряжение отстаёт от тока на 90 градусов. Это не нужно понимать так, будто ток появляется раньше, чем мы прикладываем к конденсатору напряжение, подобное невозможно. Просто амплитуда тока наступает на четверть периода раньше, чем амплитуда напряжения.

Т-133. Ёмкостное сопротивление *Х*с, как и *R*, измеряется в омах и говорит о том, какой будет ток при данном напряжении, однако мощности *Х*с не потребляет. Возьмём из предыдущего раздела твёрдо установленную истину: если к конденсатору подвести переменное напряжение, то в цепи этого конденсатора пойдёт переменный ток. Причём сила тока может быть различной, она, в частности, зависит от ёмкости С конденсатора — чем больше С, тем больше ток (при одном и том же напряжении!), поскольку больше зарядов движется в цепи при заряде и разряде конденсатора.



ВК-159. *В мощном электрогенераторе основные обмотки (в них создаётся выходная мощность) размещены в статоре, а в роторе находится электромагнит — в таком варианте через скользящие контакты легче передавать необходимую мощность. В статоре трёхфазного генератора три обмотки, сдвинутые на угол 120 градусов. Электромагнит, вращаясь, поочерёдно проходит мимо каждой из них и поочерёдно наводит в них три переменные э.д.с., сдвинутые по фазе (по времени) на 120 градусов, то есть на 1/3 периода.*


+
I
t
1
I
$I_{ампл}$
$I_{эф}$
t
2
Во многих электрических цепях переменный ток работает так же хорошо, как и постоянный. Но, конечно, с меньшей эффективностью, чем при амплитуде Uампл (Iампл). Для синусоидального тока работающие (эффективные) значения таковы:
$U_{эф} = 0{,}7 \cdot U_{ампл}$; $I_{эф} = 0{,}7 \cdot I_{ампл}$; $P_{эф} = 0{,}5 \cdot P_{ампл}$.

Р-59. ВО МНОГИХ СЛУЧАЯХ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК РАБОТАЕТ ТАК ЖЕ ХОРОШО, КАК И ПОСТОЯННЫЙ. Если подключить лампочку к источнику постоянного тока, а рядом такую же лампочку подключить к источнику переменного тока с указанным на лампочке

напряжением, то обе лампочки будут светиться одинаково ярко. Это говорит о том, что в каких-то случаях переменный ток работает так же хорошо, как и постоянный. И действительно, количество выделяемого тепла не зависит от направления тока. Электроны, бегущие туда-обратно и создающие переменный ток, будут сталкиваться с неподвижными атомами точно так же, как электроны постоянного тока, движущиеся в одну сторону. Дело в другом — только что мы незаметно проскочили мимо серьёзной проблемы, связанной с напряжением в цепи переменного тока. О каком напряжении может идти речь, если оно переменное? Взять какое-либо мгновенное напряжение нельзя — через мгновение оно изменится. Взять амплитуду тоже нечестно — она появляется всего два раза за весь период. Для оценки работоспособности переменного тока вводится величина его эффективного напряжения, сокращенно $\mathbf{U}_{эф}$. Это такое постоянное напряжение, которое работает так же хорошо, как и переменное напряжение, о котором идёт речь. Для синусоидального переменного тока $\mathbf{U}_{эф}$ составляет примерно 70 % от амплитуды переменного напряжения (тока, э.д.с.). На всех электроприборах, в любых проспектах, инструкциях и другой документации для них указано именно эффективное напряжение, при котором эти приборы нормально работают.

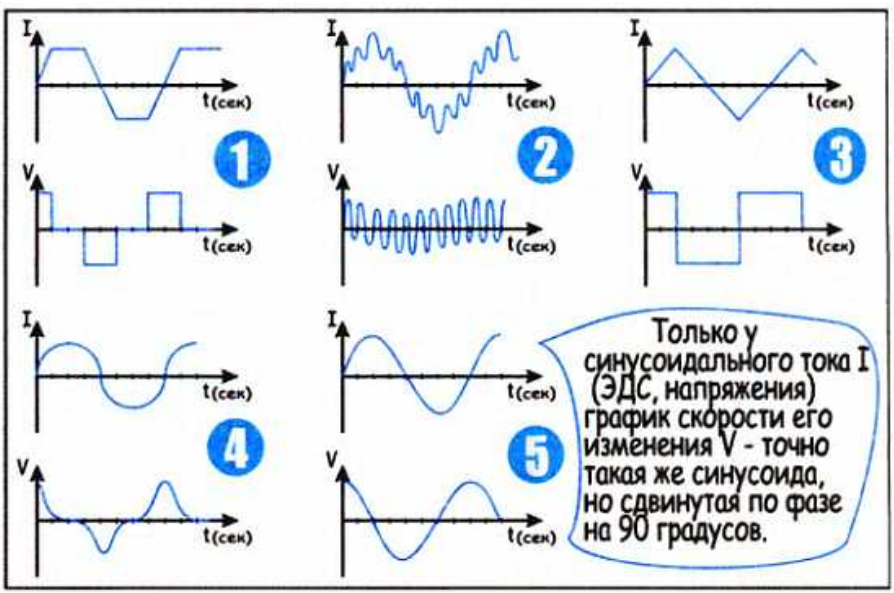
Тот факт, что конденсатор влияет на величину переменного тока в цепи, уже чем-то напоминает известный нам закон Ома, где ток зависит от сопротивления цепи R. Поэтому конденсатор, который, как известно, постоянного тока не пропускает, в цепи переменного тока считается особым ёмкостным сопротивлением, которое обозначают X_C. Зависит ёмкостное сопротивление X_C от ёмкости конденсатора C и от частоты/переменного тока (э.д.с., напряжения), и всё это объясняется очень просто. Ёмкостное сопротивление X_C зависит от ёмкости C потому, что с её увеличением конденсатор при одном и том же напряжении может принять на свои обкладки больше зарядов, и поэтому больше будут зарядный и разрядный токи. А раз ток растёт, то, значит, согласно закону Ома сопротивление, в данном случае ёмкостное сопротивление X_C, стало меньше. Отсюда вывод: ёмкостное сопротивление X_C обратно пропорционально ёмкости C — чем больше C, тем меньше X_C.

Величина тока, как мы только что установили, зависит ещё и от того, с какой скоростью меняется напряжение. Чем больше эта скорость, тем больше зарядов за одну секунду приходит на обкладки конденсатора и уходит с них, тем, следовательно, больше ток. А чем больше ток, тем, следовательно, меньше сопротивление. Отсюда зависимость ёмкостного сопротивления X_C от частоты f — чем больше частота f тем быстрее меняется переменное напряжение, если, например, частота повысится в 10 раз, то напряжение будет всякий раз доходить до своей амплитуды в 10 раз быстрее. Поэтому чем выше частота f переменного напряжения, чем быстрее оно меняется, тем больше ток в цепи конденсатора, а значит, меньше ёмкостное сопротивление X_C.

Чтобы удобнее было учитывать влияние ёмкости C и частоты f на ток, их как раз и сводят в гибридную величину по имени ёмкостное сопротивление X_C. Оно позволяет получить стандартные формулы закона Ома для цепи переменного тока с конденсатором, такие же простые и удобные, как для цепи с резисторами.

Есть, однако, одно принципиальное различие между активным сопротивлением R и ёмкостным сопротивлением X_C: ёмкостное сопротивление хоть и влияет на ток в цепи, но никакой мощности от генератора не потребляет. В какие-то моменты, правда, генератор затрачивает усилия на то, чтобы зарядить конденсатор, но конденсатор честно возвращает полученную энергию во время разряда. Этим он очень напоминает пружину, которая всё, что берёт при сжимании, то и отдаёт, распрямляясь. Чтобы отметить эту особенность ёмкостного сопротивления, его, в отличие от активного R, называют «реактивное сопротивление».

ВК-160. *Электрическая мощность в электрогенераторе не появляется сама по себе, чтобы получить её, нужно выполнить большую работу, вращая ротор генератора. При этом приходится преодолевать его огромное сопротивление, так как магнитное поле с большой силой выталкивает провода, в которых наводится ток. Сам электрогенератор — машина с малыми потерями, с хорошим использованием полученной энергии. Но этого никак не скажешь практически обо всех двигателях, создающих первичное вращение.*



Р-60. БЫВАЕТ, ЧТО ВСЁ ЗАВИСИТ ОТ СКОРОСТИ. В нашу программу более детального изучения синусоиды входит и знакомство со скоростью её изменения. Уже несколько раз отмечалось, что есть процессы, которые, развиваясь, зависят от какой-либо величины, как, например, ток в лампочке зависит от напряжения. А есть процессы, которые зависят от скорости изменения, как, например, путь, пройденный автомобилем, зависит от скорости его движения. На этом рисунке показано пять пар графиков (1, 2, 3, 4, 5), иллюстрирующих такие процессы, — в каждой паре график I иллюстрирует сам процесс, а график **V** — скорость изменения этого процесса. Особо выделяется пара графиков на последнем рисунке (5). В качестве основного процесса I здесь выбрана синусоида, а скорость её изменения **V** оказалась также синусоидой, но опережающей основную кривую на 90 градусов. Не будем тратить время на объяснения (хотя это очень просто), а лишь отметим, что график с таким сдвигом фаз называется «косинусоида». Нам можно в упрощённом виде запомнить важный вывод: график скорости изменения синусоиды есть тоже синусоида, на четверть периода опережающая по фазе основной график.

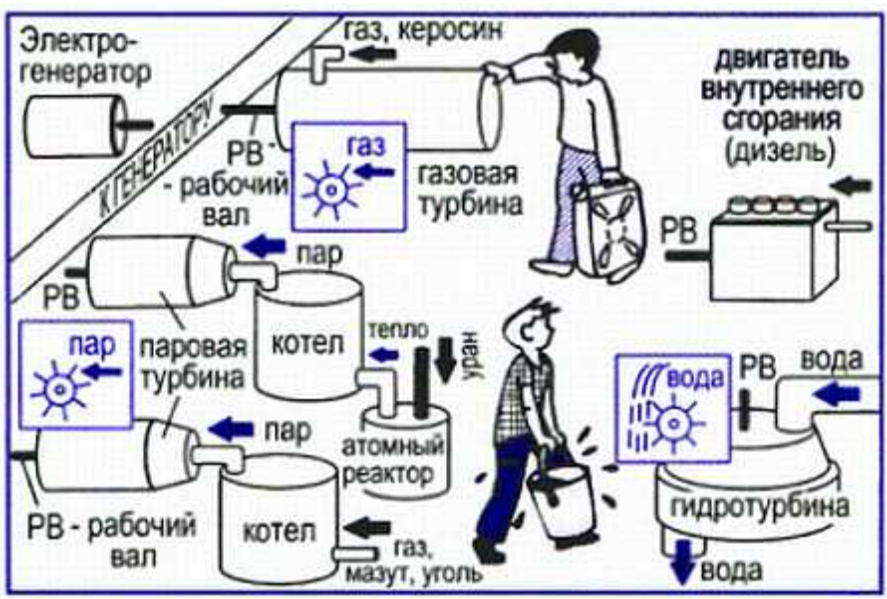
Т-134. **Описание фазовых сдвигов между током и напряжением нередко вызывает острую критику читателей, забывших, что такие сдвиги вполне объяснимы.** Наш рассказ о фазовых сдвигах в цепях переменного тока мы сейчас прервём, чтобы напомнить читателю особенности данного процесса. Это поможет не просто запомнить некоторые важности, о которых уже было сказано и ещё будет, но и позволит навсегда отнести их к числу совершенно естественных и легко объяснимых. А это очень важная составляющая вашего отношения ко всему изучаемому предмету и особенно к вашим будущим самостоятельным действиям.

Чаще всего недовольство и даже протесты вызывает сдвиг фаз между током и напряжением в цепи конденсатора или катушки. «Какие вообще могут быть фазовые сдвиги между током и напряжением здесь, в единой цепи? — возмущается строгий критик. — Когда напряжение доходит до своей амплитуды, ток равен нулю — как такое возможно? Почему у этой пары — у тока и напряжения — не работает обязательный для всех закон Ома, с которым мы познакомились ещё при изучении цепей постоянного

тока?» Нашему критику полезно напомнить, что согласно закону Ома, который он вспомнил, в нашей цепи вообще никакого тока не должно быть — для постоянного тока цепь разорвана диэлектрической прокладкой конденсатора. Механизм появления тока здесь совсем иной — ток появляется при движении зарядов к обкладкам или от них, и, значит, сила тока зависит от того, как меняется напряжение на конденсаторе. Следуя за скоростью изменения напряжения, меняется ток, при этом — так получается! — он опережает напряжение по фазе.

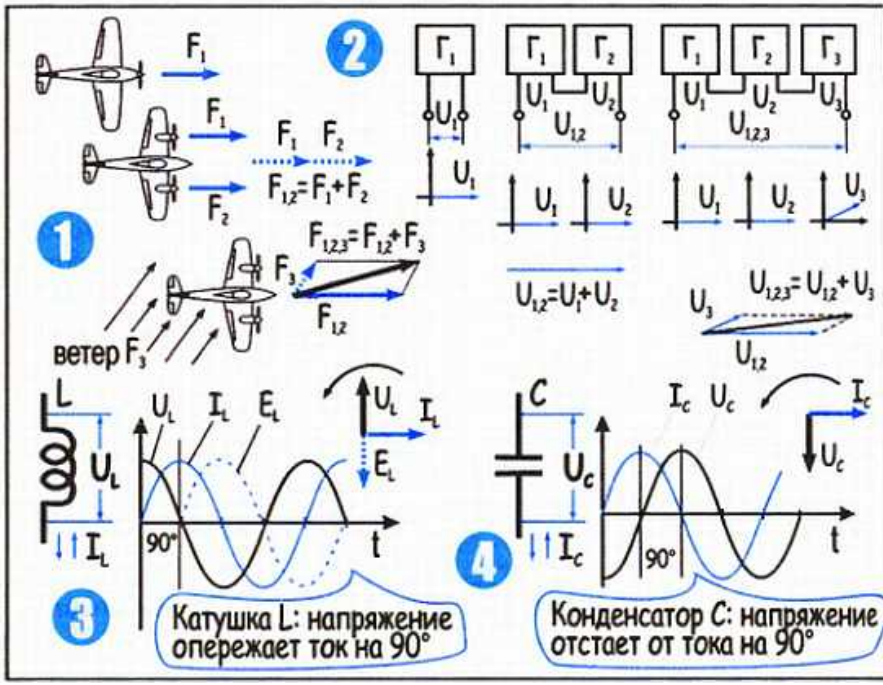
Нечто похожее происходит и в цепи с катушкой индуктивности, и об этом будет рассказано незамедлительно.

То, что нам недавно продемонстрировал конденсатор, могло показаться большой неожиданностью. Было известно, что через диэлектрик ток пройти не может, а тут, оказывается, в цепи конденсатора под действием переменного напряжения прекрасно идёт переменный ток и, больше того, соблюдается закон Ома, придуманный для цепей переменного тока.



ВК-161. *Основные двигатели на электростанциях — паровые турбины. Они работают с генераторами мощностью от 50 тысяч до 1,5 миллиона киловатт и получают пар из котла, где сжигается мазут, уголь, газ или используют распад атомных ядер. Про важную особенность паровых турбин лучше скажут цифры: в мире более 20 крупных предприятий, занятых разработкой и производством турбин, на каждом работает 5-10 тысяч человек, гарантируется непрерывная работа турбины до капитального*

ремонта 100 000 часов, то есть более 11 лет.



Р-61. ОБЪЯСНИМЫЕ СТРАННОСТИ В ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. Большой специальный раздел математики работает с векторами. Это короткие отрезки прямых линий в виде стрелки — они в определённом масштабе могут отображать самые разные силы и направление их действия. В качестве примера можно назвать силы, двигающие самолёт (1) или несколько разных напряжений, в том числе со сдвигом фазы (2). Особо интересны цепи переменного тока с катушкой (3) и конденсатором (4), где появляется сдвиг фаз между током и напряжением. Если конденсатор **C** включить в цепь, где действует переменное напряжение $\mathbf{U}_c$, то оно будет непрерывно заряжать и разряжать конденсатор и в его цепи будет непрерывный переменный ток $\mathbf{I}_c$. Его величина зависит от скорости изменения напряжения $\mathbf{U}_c$, и, всмотревшись в графики $\mathbf{U}_c$ и $\mathbf{I}_c$, можно заметить, что ток опережает напряжение по фазе на 90 градусов. Об этом же говорит векторная диаграмма векторов $\mathbf{U}_c$ и $\mathbf{I}_c$, которая как всегда вращается против часовой стрелки, — наблюдатель сначала видит вектор тока, а через четверть периода вектор напряжения. Аналогичную, но, правда,

более сложную картину можно наблюдать в цепи с катушкой индуктивности **L**. При изменении тока $\mathbf{I}_L$ меняется её магнитное поле и в самой катушке наводится э.д.с. самоиндукции $\mathbf{E}_L$ (синяя пунктирная линия на графике), которая опережает ток на 90 градусов. Её может подавить поступающее от генератора напряжение $\mathbf{U}_L$, которое противодействует электродвижущей силе $\mathbf{E}_L$, то есть сдвиг фаз между $\mathbf{U}_L$ и $\mathbf{E}_L$ составляет 180 градусов. Естественно, что при этом напряжение $\mathbf{U}_L$ отстаёт по фазе от тока $\mathbf{I}_L$ на 90 градусов.

От катушки индуктивности никаких неожиданностей вроде бы не ждёшь — шёл через неё постоянный ток от гальванического элемента, пойдёт и переменный, ну пусть с какими-нибудь своими особенностями. Вместе с тем, катушка в цепи переменного тока ведёт себя, на первый взгляд, ещё более странно, чем конденсатор.

Как это было в цепи с конденсатором *C*, то, что происходит в катушке *L*, когда по ней течёт переменный ток, объясняют два знакомых нам графика на рисунке Р-60 и сделанный из них очень важный вывод: «График скорости изменения синусоиды это тоже синусоида, но сдвинутая по фазе на четверть периода (на 90 градусов)». Правда, в случае с катушкой объяснение усложняется тем, что здесь три главных действующих лица, а в цепи с конденсатором их было только два — переменное напряжение и переменный ток.

Предположим, что в катушке *L* течёт переменный ток I_L, и посмотрим, каким при этом будет напряжение U_L на катушке. Вспомните, что если в катушке меняется ток, то в ней наводится э.д.с. самоиндукции, обозначим её E_L. Поскольку ток I_L меняется непрерывно, то и э.д.с. E_L существует всё время, её величина, как всегда, зависит от индуктивности катушки и от скорости изменения тока I_L. Исходя из этого, можно построить два сдвинутых на 90 градусов графика — тока I_L и э.д.с. самоиндукции E_L (Р-61.4).

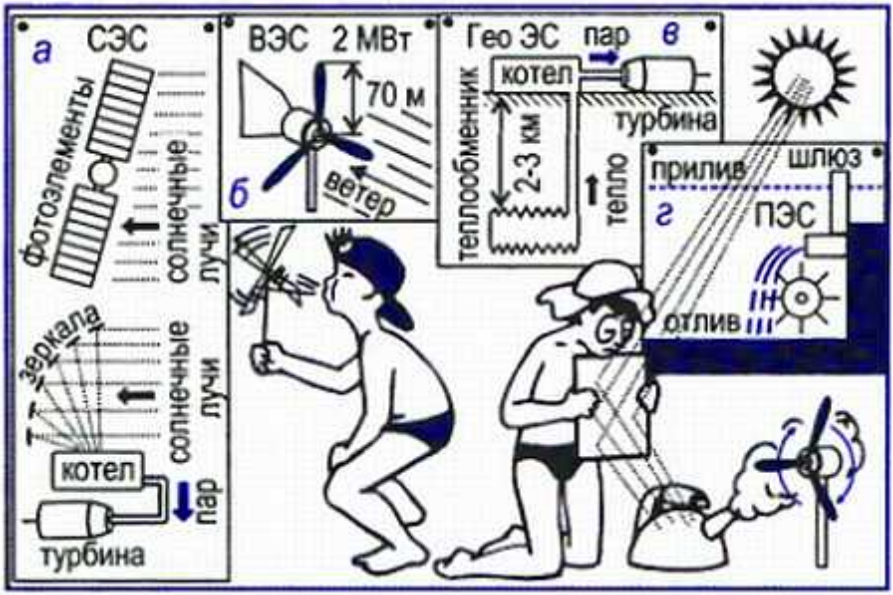
А где же переменное напряжение U_L которое подводится к катушке *L* от генератора? Где эта первопричина всего происходящего — переменное напряжение, которое и создало переменный ток в катушке? Чему оно равно? Как меняется? Какое место занимает на общем графике?

Известно, что э.д.с. самоиндукции всегда препятствует изменениям тока — таков закон природы. И если хоть на мгновение оставить её один на один с этим током, то э.д.с.

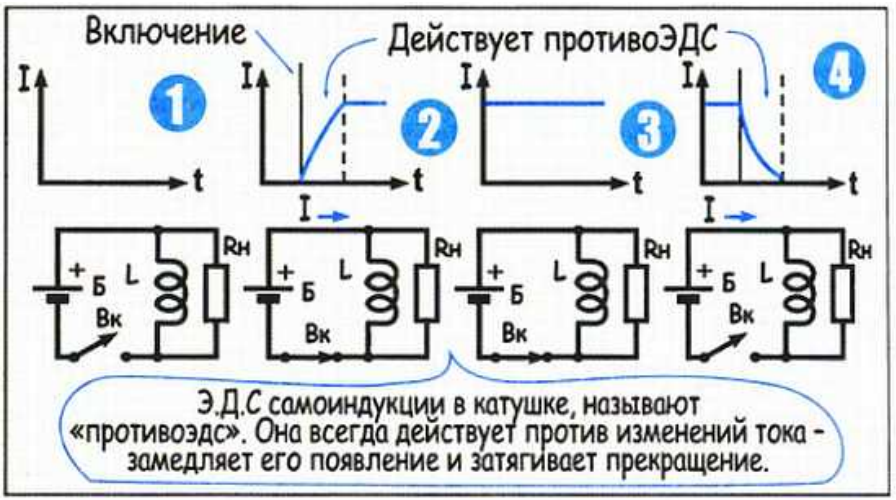
самоиндукции задавит породивший её ток (Т-8) и при этом, конечно, тут же погибнет сама — нет переменного тока в катушке, нет и самоиндукции.

Существует только одна сила, которая может поддерживать ток в цепи, противодействуя мешающей э.д.с. E_L. Эта сила — внешнее напряжение U_L, которое действует на катушке и представляет собой часть электродвижущей силы генератора. Чтобы скомпенсировать э.д.с. самоиндукции E_L внешнее напряжение U_L должно бить по ней (Т-8) в противофазе, то есть со сдвигом фазы на 180 градусов, на полпериода. Именно это и показано на объединённом графике Р-61.4, который рассказывает о действиях всех трёх героев сражения: U_L, I_L и E_L. Напряжение U_L на катушке всегда равно по величине и противофазно электродвижущей силе самоиндукции E_L, то есть всегда действует в противоположную сторону. При этом ток I_L как бы отстаёт от напряжения U_L на 90 градусов — амплитуда тока появляется на четверть периода позже, чем амплитуда напряжения. Или, скажем иначе, напряжение на катушке индуктивности опережает по фазе ток в ней на 90 градусов.

Выбранная схема рассуждений не должна создавать представление, что U_L и E_L друг друга уничтожают, и ток I_L течёт сам по себе. Нам пришлось очень упростить картину, на самом деле процесс сложный, динамичный, и только ещё одно упрощение помогает рассказать об этой динамике. Сначала появляется напряжение U_L, за ним ток I_L, и в результате его изменений наводится э.д.с. самоиндукции E_L. Но помешать току она уже не может, её полностью подавляет напряжение U_L. Это упрощённое описание подкреплено показаниями измерительных приборов: амперметр, включённый в цепь катушки, показывает ток I_L, а подключённый к ней вольтметр — напряжение U_L.



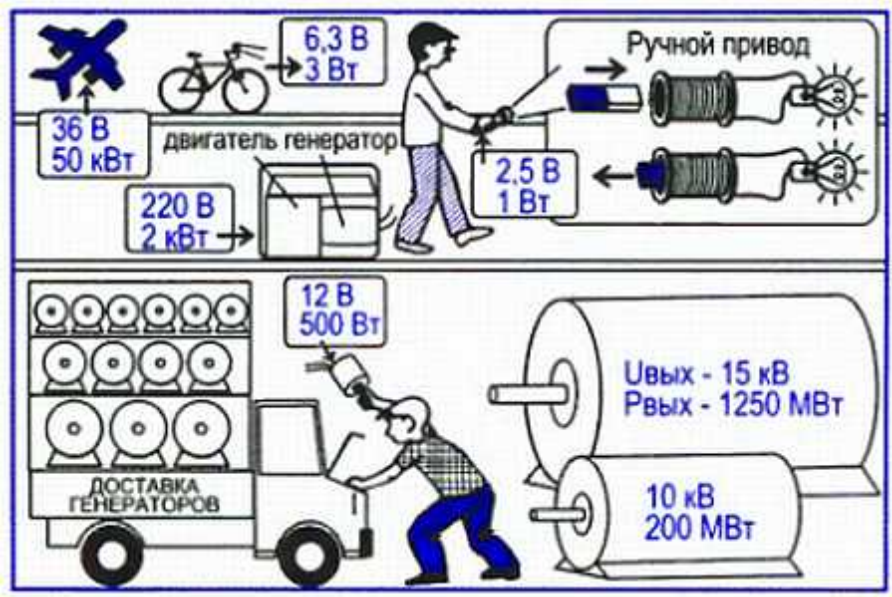
ВК-162. *В последние годы много говорят про, как их называют, альтернативные источники энергии: ветер, солнечное излучение, морские приливы и другие. Уже есть заметные успехи: например, во многих районах появились большие серийного производства ветрогенераторы, работают приливные электростанции и зреют проекты значительно более мощных станций, реализуются смелые идеи использования тепла Земли. Можно надеяться, что альтернативные системы реально помогут мощной энергетике.*



Р-62. Э.д.с., КОТОРАЯ ВСЕГДА ПРОТИВ. Есть

огромное количество схем с катушками и конденсаторами, у каждой из них свои возможности и особенности. Но есть при этом немало особенностей, общих для целой группы схем. Так, например, в схемах с катушками при изменении тока наводится электродвижущая сила (э.д.с. самоиндукции), которую часто называют «противоэ.д.с.». Потому что эта наведённая э.д.с. всегда препятствует изменениям тока. Вы подключили катушку к генератору, в ней мгновенно, казалось бы, появился ток, который определяется напряжением генератора и сопротивлением катушки. Однако стабильная величина тока появится не сразу — в катушке будет наведена э.д.с., которая замедлит нарастание тока. А при выключении катушки ток в ней сразу не прекратится — противоэ.д.с. будет мешать его резкому уменьшению.

T-135. **Индуктивное сопротивление X_L, как и обычное активное сопротивление R, говорит о том, какой будет ток при данном напряжении, однако, в отличие от R, мощности X_L не потребляет.** Теперь о соотношении между током и напряжением. Это соотношение автоматически устанавливается таким образом, чтобы мешающая току э.д.с. самоиндукции E_L в точности уравновешивалась бы напряжением U_L на катушке. С подобной автоматикой мы уже встречались: постоянное напряжение на последовательно соединённых резисторах автоматически распределялось так, чтобы ток во всей цепи был одинаковым. Вот пример работы автоматики в катушке, по которой идёт переменный ток. Допустим, что в какой-то момент напряжение U_L увеличилось в два раза, и вместе с ним в соответствии с законом Ома в два раза увеличился ток. При этом, конечно, увеличилась и скорость его возрастания: если, например, раньше за 1 с ток нарастал до амплитуды 1 А, то теперь он будет за ту же секунду нарастать до 2 А, то есть скорость нарастания тока будет в два раза больше. А значит, возрастёт э.д.с. самоиндукции E_L противодействующая изменениям тока, но рост её автоматически остановится, когда E_L уравняется с напряжением U_L.



ВК-163. *Наряду с электростанциями нас окружает множество машин-помощников, имеющих собственные источники электричества. Взять, к примеру, велосипедный электрогенератор или карманный фонарик, где вместо батарей лампочку кормит электричеством маленький генератор, который приводится в действие рукой. А с другой стороны, пассажирский самолёт, его моторы между делом вращают роторы генераторов, снабжающих электричеством множество двигателей, насосов, навигационных приборов.*

Ток в катушке уменьшится и в том случае, если увеличить её индуктивность L, при этом должна возрасти э.д.с. самоиндукции E_L, и чтобы она не превысила подводимое к катушке напряжение U_L автоматически уменьшится ток, компенсируя рост L. Напомним: э.д.с. самоиндукции в равной мере зависит и от индуктивности катушки, и от скорости изменения тока, а значит, от частоты f.

Итак, увеличение частоты f и увеличение индуктивности L влечёт за собой уменьшение тока в катушке. Это позволяет объединить частоту/и индуктивность L в единой характеристике с названием «индуктивное сопротивление» X_L и с его помощью получить простые формулы закона Ома.

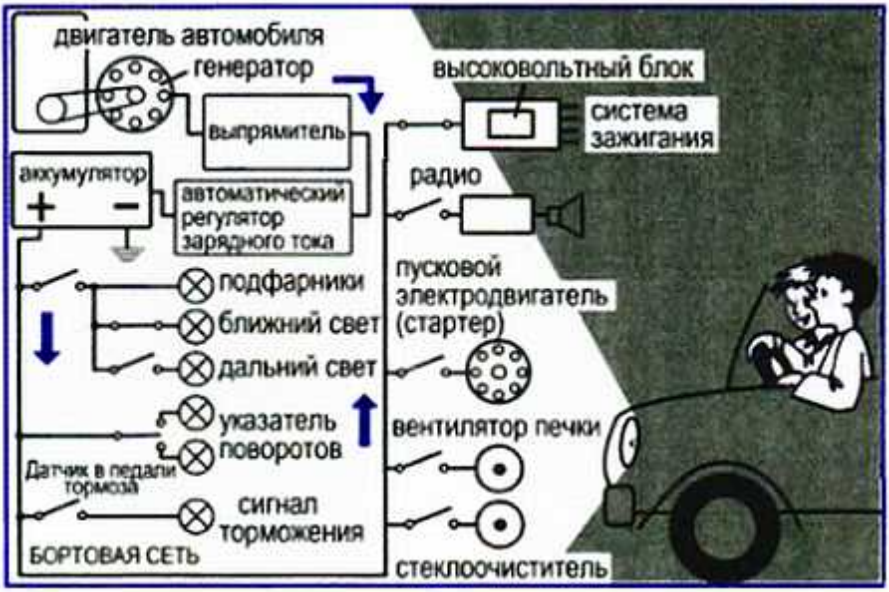
Индуктивное сопротивление X_L похоже на ёмкостное X_C тем, что меняется с частотой. Но если с увеличением частоты f сопротивление X_C падает, то X_L с ростом частоты тоже растёт. Катушка, если пренебречь сопротивлением её проводов, так же,

как и конденсатор, оказывается не активным, а реактивным элементом цепи, и индуктивное сопротивление X_L, так же, как ёмкостное X_C, влияет на величину тока, но мощности от генератора не потребляет. Всё, что в какие-то моменты катушка отбирает у генератора на создание магнитного поля, она отдаёт в цепь обратно, когда это поле исчезает. И происходит такое «беру-отдаю» много и очень много раз в течение каждой секунды.

Т-136. **Индуктивное сопротивление X_L катушки и её активное сопротивление R нельзя просто сложить, чтобы подсчитать их общее сопротивление**. Пытаясь выяснить, откуда берётся и от чего зависит индуктивное сопротивление X_L катушки, мы договорились не учитывать её активное сопротивление R. Так действительно можно поступать, если R во много раз меньше, чем X_L, и поэтому на процессы в цепи практически не влияет. Но это бывает не всегда, случается, что X_L и R вполне соизмеримы, а кроме того, вместе с катушкой в цепь может быть включено какое-нибудь другое активное сопротивление, например, гасящее или нагрузка. Поэтому попробуем посмотреть, что происходит в цепи из двух последовательных элементов — чистой индуктивности L и сопротивления R, в котором объединены все имеющиеся активные сопротивления, в том числе и сопротивление провода, из которого сделана катушка.

В цепях постоянного тока последовательные сопротивления просто суммировались, в данном же случае этого сделать нельзя — последовательно соединяются совершенно разные элементы, один из которых назвали сопротивлением с серьёзной оговоркой: «мощности не потребляет». Кроме того, напряжение на активном сопротивлении совпадает по фазе с током, а напряжение на индуктивности опережает ток на 90 градусов. Каким будет общее напряжение на участке из двух элементов цепи — R и L? Как оно будет сдвинуто по фазе относительно тока? Какая мощность будет выделяться на активной части нашей пары? Какая общая мощность будет циркулировать в цепи?

Чтобы как-то ответить на эти сложные вопросы, проще всего в минимальном объёме познакомиться с ещё одним профессиональным языком. До сих пор мы встречали язык электрических схем, язык простейших формул и язык графиков. Сейчас на помощь нам придёт довольно простой и очень удобный язык векторных диаграмм.



ВК-164. *Многим хорошо знакома электрическая система автомобиля, включающая самые разные аппараты и приборы. Основа всего — аккумулятор, который при движении подзаряжается от генератора. От этой электростанции получают питание две жизненно важные системы — периодический впрыск бензина в цилиндры двигателя и высоковольтная система (в районе 20 тысяч вольт) подачи искры в топливную смесь. Выключателями или (и) автоматикой подаётся напряжение 12 вольт на все электрические приборы автомобиля.*

Т-137. **Векторная диаграмма помогает представить себе и количественно оценить многие процессы, в том числе в цепях переменного тока**. В конце сороковых годов прошлого теперь уже века, то есть примерно шестьдесят с лишним лет назад (точную дату очевидцы не записали), на известном одесском пляже Ланжерон приземлились марсиане. Может быть, конечно, они прибыли не с Марса, а с другой нашей планеты или даже из другой звёздной системы, но мы по привычке (фантастические романы нас приучили к тому, что на Марсе есть люди) любых пришельцев называем марсианами. Побыли эти пришельцы у нас в Одессе на пляже около часа, искупались в море и улетели. Скорее всего, домой, на Марс. Ничем они местных жителей не удивили — люди как люди. К нашей земной жизни пришельцы тоже никакого внимания не проявили, не увидели, скорее всего, ничего поучительного.

Единственное, что привлекло их особое внимание и вызвало

бурную реакцию, так это большие часы у входа на пляж. Марсиане долго их рассматривали, что-то при этом обсуждали на своём марсианском языке и почему-то громко смеялись. Один из одесситов, человек изобретательный и настойчивый, контактируя с пришельцами с помощью жестов и рисунков на песке, сделал очень интересное открытие.

У марсиан, оказывается, совсем другая система отсчёта времени и совсем другие часы. У них вместо наших секунд, минут и часов есть одна единица времени, называется она градус, и весь круговой циферблат часов имеет 360 делений — он разбит на 360 градусов. Стрелка на часах у них одна, и вращается она в обратную сторону — против нашей часовой стрелки. Автор открытия вскоре опубликовал в местной газете «Черноморська комуна» восторженную заметку о марсианских часах и предложил найти им применение. Будучи по профессии врачом-диетологом, он не знал, что подобная система отсчёта времени уже давно применяется в электротехнике и лежит в основе часто употребляемого профессионалами языка с названием «Векторные диаграммы».

Векторные диаграммы уже несколько раз появлялись на наших рисунках (Р-61.3, Р-61.4, Р-63, Р-64, Р-65 и других), так что читатель наверняка обратил на них внимание, хотя в подписях к рисункам о самих векторных диаграммах говорилось немного, а иногда даже не было сказано совсем. Пытаясь ликвидировать эти недостатки, хочется сказать несколько слов о векторных диаграммах, взяв за основу, к примеру, рисунок Р-61. На этом рисунке (Р-61.3) видно, что в цепи переменного тока с одним конденсатором напряжение на нём отстаёт от тока на 90°, то есть на четверть периода. Это видно на основном графике тока и напряжения — сначала на нём появляется амплитуда тока I_C, а затем, через четверть периода, амплитуда напряжения U_c. Об этом же говорит расположенная рядом (справа) простейшая диаграмма, состоящая из двух векторов — I_c и U_c Согласно правилу, принятому для таких диаграмм, мы вращаем её против часовой стрелки. Таким образом, наблюдатель, мимо которого движется диаграмма, сначала видит вектор тока и через четверть оборота (то есть с запаздыванием на четверть периода) вектор напряжения.

Сейчас, пожалуй, самый момент напомнить, что вектор — это отрезок определённой длины, она в выбранном масштабе соответствует характеристике, которую на диаграмме отображает вектор. Так, например, можно принять, что каждый сантиметр длины вектора U_c отображает напряжение 10 вольт, и тогда вектор длиной 3 сантиметра будет означать, что U_c равно 30

вольт. Здесь, пожалуй, нужно отметить, что эта возможность не используется в наших векторных диаграммах. Наша задача была лишь в том, чтобы показать сдвиг фаз между токами и напряжениями, не учитывая их величину. Именно поэтому выбраны одинаковые по длине векторы тока и напряжения, и не нужно делать из этого серьёзных выводов.

Глава 12
Семь простейших сложных цепей переменного тока

Многие известные писатели и драматурги названия своих произведений или отдельных глав в них начинали с числительного. Вспомните: «Двенадцатая ночь», «Пять вечеров», «Три сестры», «Четвёртый позвонок», «Двенадцать стульев» — список большой. Вдохновлённый примером мастеров, автор в поисках названия для этой главы сразу же поставил в начале числительное, а затем, стараясь не перегрузить читателя, лишь менял это числительное в сторону уменьшения. В итоге осталась великолепная семёрка — семь поучительных примеров, семь электрических цепей переменного тока, которые мы назвали сложными не по их конфигурации или по числу элементов, а по тем процессам, которые в них происходят. В эту семёрку входят цепи, в которых один резистор **R** (1), один конденсатор **C** (2) или одна катушка индуктивности **L** (3). Их дополняют два соединения **RC** (4) и **RL** (5), а также всемирно известный комплект **LCR** (6) по имени «колебательный контур».

Седьмая сложная цепь, а именно **трансформатор** (7), выделена, как говорят финансисты, отдельной строкой, она появится в наших заметках несколько позже.

Т-138. **Из семи включённых в список сложных цепей нам осталось познакомиться всего лишь с тремя.** Многие читатели, просматривая введение к этой главе, наверняка обратили внимание на то, что с некоторыми представителями «великолепной семёрки» нет смысла знакомиться, поскольку мы с ними уже знакомы или познакомимся чуть позже. И действительно, знакомство с трансформатором отложено, а цепь переменного тока с одним активным сопротивлением R попала в нашу семёрку, так сказать, для порядка, чтобы вместе с X_C и X_L закрыть тему одиночных сопротивлений в цепи переменного тока. У резистора R, как известно, напряжение и ток совпадают по фазе, для него при переменном токе, как и при постоянном, легко пользоваться законом Ома, вычислять мощность и работу,

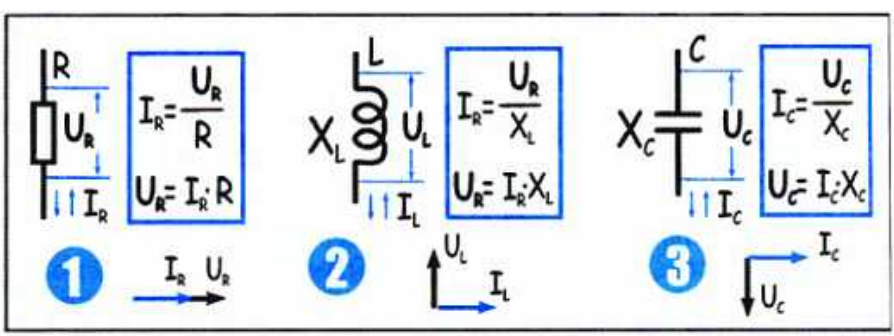
главное — не забывать, что ты имеешь дело с эффективным значением переменного тока и переменного напряжения. Что касается цепей с конденсатором C или с катушкой L (сопротивления X_C или X_L), то про них было достаточно подробно рассказано (Р-61, Т-132 и далее). С учётом всего этого, мы сейчас перейдём к оставшимся трём сложным цепям переменного тока.

Т-139. **Напряжение, действующее на последовательных цепях *RC* или *RL*, можно найти с помощью векторных диаграмм.** Начнём с напоминания о том, что во всех участках последовательной цепи идёт один и тот же ток (Р-65), в последовательной RC-цепи мы называем его I_{RC}. Вектор этого тока, как в своё время вектор I_R, располагаем по горизонтальной оси — считайте, что мы так договорились. Первый вектор можно в принципе расположить как угодно, главное, чтобы все остальные векторы на диаграмме были правильно пристыкованы к этому первому вектору. Точно так же, как I_{RC}, направлен вектор напряжения U_R на активном сопротивлении R, то есть это напряжение совпадает по фазе с током. Напряжение U_C на конденсаторе С отстаёт от тока на 90°, его вектор, как и раньше, направлен вниз.

Теперь остаётся главное — нужно найти неизвестное пока общее напряжение на всей RC-цепочке. Сделать это можно чисто графически, используя правило сложения векторов (Р-61, Р-65). Примерно так же мы построим векторную диаграмму для последовательной RL-цепи — главное отличие здесь в том, что вектор напряжения U_L опережает вектор тока I_{RL} и поэтому откладывается от нуля вверх.

Т-140. **При параллельном соединении элементов *RC* или *RL* векторная диаграмма строится на основе общего напряжения, а не общего тока.** При параллельном соединении элементов цепи *RC* или *RL* токи в отдельных ветвях могут различаться, но на параллельных элементах цепи обязательно действует одно и то же напряжение. Его и удобно взять за основу при построении векторной диаграммы, которая в итоге должна показать общий ток I_{RC} или I_{RL}.

ВК-165. *Появившийся в нашем рассказе аккумулятор — хороший повод напомнить об этом накопителе электрической энергии. В автомобиле, как правило, используется батарея из шести кислотных (свинцовых) аккумуляторов с общим напряжением около 12 вольт. При зарядке в химическом составе электродов и электролита накапливаются вещества, которые при разряде будут поддерживать (+) и (-) на электродах. Гидравлическая аналогия поясняет, как накапливается и расходуется энергия в аккумуляторе.*



Р-63. СОПРОТИВЛЕНИЕ АКТИВНОЕ И РЕАКТИВНОЕ. Просто было иметь дело с цепями постоянного тока, особенно с активными сопротивлениями в них, вроде электрической лампочки или кофеварки. Активными такие сопротивления назвали потому, что они активно

забирают электрическую энергию у генератора, превращают её в тепло, в свет, в механическую работу. Об этой забранной энергии можно судить по току, который пойдёт в цепи при включении в неё какого-либо активного сопротивления — чем больше этот ток, тем больше забранная энергия.

Конденсатор и катушка, включённые в цепь генератора переменного напряжения, тоже меняют ток цепи — они тоже создают для тока определённое сопротивление. Но только никакой энергии у генератора эти сопротивления не отбирают — поэтому в отличие от активных их называют реактивными сопротивлениями. Зная эти сопротивления, можно и в цепях переменного тока пользоваться законом Ома, не забывая при этом, что при расчётах значения всех токов и напряжений должны быть одного вида, например, только эффективные или только амплитудные. Для напоминания возле каждого из сопротивлений приведена векторная диаграмма, показывающая сдвиг по фазе между током и напряжением. Как и следовало ожидать, в активном сопротивлении R никакого сдвига фаз нет — ток и напряжение растут или падают одновременно.

T-141. **На векторной диаграмме нетрудно учесть появление третьего элемента и образование последовательной или параллельной *LCR*-цепи.** Если в последовательную цепь из конденсатора C и сопротивления R включить ещё и катушку L, то на векторной диаграмме сначала появится всего один новый вектор U_L, отображающий напряжение на катушке. Он направлен строго против вектора U_c, поскольку напряжение на конденсаторе отстаёт от тока на 90°, а напряжение на катушке опережает ток на 90°, то есть суммарный сдвиг фаз между U_c и U_L составляет 180° (Р-66). В итоге общее реактивное напряжение U_{LC} будет равно разности двух этих напряжений — кто из них окажется больше, тот и определит направление результирующего вектора U_{LC}. Все дальнейшие построения векторной диаграммы ведутся так же, как и для последовательной цепи с двумя участниками — R_c или R_L.

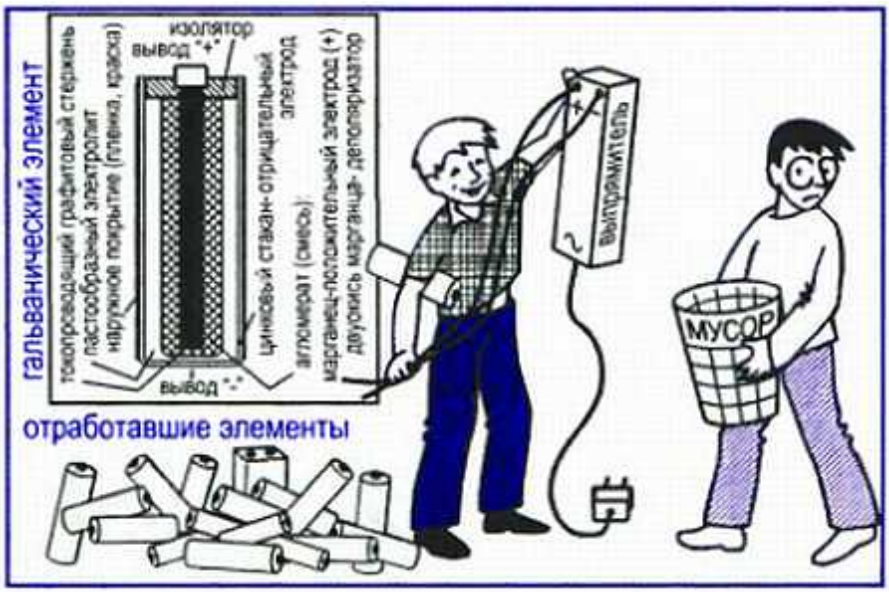
Из тех же соображений строится векторная диаграмма для параллельного соединения LCR, но в этом случае за основу берётся вектор общего напряжения U_{LCR}, а вектор результирующего реактивного тока I_{LCR} определяется как разность противофазных, то есть действующих один против

другого, векторов тока I_L и I_C. Чаще, правда, встречается иная схема параллельной LCR-цепи, где активное сопротивление R включено последовательно с катушкой L. Построить векторную диаграмму для этого случая несколько сложнее, но тоже не спеша это вполне может быть сделано.

Три последних примера показали, что построение векторных диаграмм дело не такое уж сложное. При этом они действительно очень наглядно рассказывают о многом, что трудновато представить себе без этих диаграмм. Кроме того, они в большом количестве присутствуют в серьёзных учебниках электротехники, и, таким образом, мы сделали ещё один вклад в непростое дело подготовки к работе с ними. Наконец, всматриваясь в векторные диаграммы, можно сделать немало полезных выводов. Например, о поведении некоторых цепей переменного тока при изменении его частоты.

T-142. **Реактивные сопротивления X_L и X_C сильно зависят от частоты, и при её изменении в цепях с L или C меняются напряжения, токи и фазовые сдвиги**. Индуктивное сопротивление катушки растёт с увеличением частоты f подводимого к ней напряжения, а ёмкостное сопротивление конденсатора падает с увеличением частоты f. Поэтому в полном соответствии с законом Ома при изменении частоты должны меняться токи и напряжения, которые зависят от реактивных сопротивлений. В качестве примера для начала посмотрим, как это всё получается в простейшей последовательной RC-цепочке (Р-65) на двух разных частотах f_1 и f_2, притом что $f_1 < f_2$.

Будем считать, что генератор поддерживает неизменной амплитуду своей электродвижущей силы, что она не меняется при всех наших экспериментах и, в частности, не изменяется при перемене частоты генератора. Исходя из этого, построим две векторные диаграммы — для низкой частоты f_1 и для высокой f_2. Сравнение двух векторных диаграмм показывает, что в последовательной RC-цепи с увеличением частоты роль конденсатора снижается — его ёмкостное сопротивление X_C падает, напряжение на нём становится меньше, обусловленный присутствием конденсатора сдвиг фаз между общим током и общим напряжением тоже уменьшается, вся последовательная цепь в большей мере ведёт себя как чисто активное сопротивление.



ВК-166. *Вещества, создающие электрические заряды в электродах гальванического элемента, формируются при его изготовлении. Разряжаясь, гальванический элемент расходует их для создания тока в нагрузке. Для такого элемента выбраны дешёвые химические вещества и процессы, которые, в отличие от аккумулятора, не предусматривают возможность восстановить первоначальное состояние, то есть возможность зарядки. Поэтому полностью разрядившийся гальванический элемент считают более непригодным и просто выбрасывают.*

Построив аналогичные две векторные диаграммы для последовательной RL-цепи, мы обнаружим обратную картину. С ростом частоты индуктивное сопротивление катушки X_L растёт, роль индуктивности L возрастает, напряжение на ней увеличивается, растёт обусловленный индуктивностью сдвиг фаз между общим током и общим напряжением, всё в меньшей мере чувствуется присутствие активного сопротивления R, вся цепь в большей степени ведёт себя как чистая индуктивность.

То, что показали приведённые несложные построения, долго и трудно пришлось бы выяснять каким-нибудь другим способом. Так что язык векторных диаграмм позволяет быстро оценить поведение сложных цепей переменного тока. В данном случае простейшие векторные диаграммы позволили сделать очень важный общий вывод: то, что происходит в электрических цепях с индуктивностью и ёмкостью, в сильной степени зависит от частоты переменного тока. Или иначе: одна и та же цепь с

индуктивностью и ёмкостью может совершенно по-разному вести себя на разных частотах. Мы ещё вернёмся к этой теме, когда познакомимся со свободными электромагнитными колебаниями в LCR-цепи и явлением по имени «резонанс».

Т-143. **В электрической цепи может одновременно протекать множество переменных токов разных частот, чтобы выделить или подавить какие-либо из них, используют фильтры**. До сих пор мы считали, что в цепи действует один генератор переменной э.д.с., который создаёт один-единственный переменный ток. Но очень часто бывает, что одновременно с этим основным генератором в цепи появились и другие источники переменных токов, причём самых разных частот. Эти токи могут быть источником серьёзных неприятностей — проводник, где протекает переменный ток, излучает электромагнитные волны, а они, проникая в радиоприёмники или телевизоры, создают помехи, искажают основной сигнал. Это относится и к некоторым генераторам постоянного тока, в их цепи тоже могут появляться переменные токи и тоже с неприятными последствиями.

В какой-то мере с такими ненужными токами можно бороться с помощью электрических фильтров. Это такие цепи, которые, например, легко пропускают к нагрузке постоянный ток и не пропускают переменный. Или выполняют более тонкую операцию — пропускают к нагрузке токи только одной частоты или определённой группы частот. Есть фильтры, которым достаётся совсем уже ювелирная работа — им нужно распознать и разделить токи с очень близкими частотами.

Источники мешающих переменных токов и сами противодействующие этим токам фильтры, подобно участникам маскарада, скрыты за общими словами и размышлениями. Чтобы, как говорится, сбросить маски и познакомиться с конкретными электрическими цепями и процессами, порождающими токи посторонних частот, придётся сделать некоторое отступление и хотя бы затронуть очень важную тему, которая иногда почему-то остаётся в стороне от учебных дорог в электрический мир.

ВК-167. *Существует несколько видов так называемых гальванических комплектов — определённых веществ для электродов и электролита, которые могли бы стать основой для изготовления аккумулятора или гальванического элемента. Главные характеристики каждого такого комплекта — это его э.д.с., удельная ёмкость (количество накапливаемых зарядов на единицу массы) и допустимый разрядный ток (тоже на единицу массы), величина которого в некоторых случаях очень важна.*

Глава 13
Описание неописуемого

Очень простые расчётные формулы, позволяющие подсчитать, какое сопротивление окажут переменному току определённой частоты конденсатор или катушка, действительны только для тока, который меняется по закону синуса. Поведение колебательного контура при смене частоты мы можем легко оценить тоже только для синусоидального тока. Одним словом, вся электротехника переменного тока рассчитана прежде всего на синусоидальный ток. Однако есть способ так описать совершенно не похожий на синусоиду сложный и очень сложный ток, что для него будут действительны все законы и все формулы, рассчитанные только на ток синусоидальный.

Т-144. **Всё рассказанное о переменном токе относится только к одной его разновидности — к синусоидальному току.** Всё, что было рассказано в предыдущих разделах о переменном токе (э.д.с., напряжении), справедливо лишь для одной его разновидности — для синусоидального переменного тока. Чтобы почувствовать важность этого напоминания, полезно ещё раз взглянуть на Р-60, где показаны пять графиков разных переменных токов. Во многом они похожи — токи меняются и по величине, и по направлению, у них одинаковые амплитуды, одинаковый период, а значит, и частота. Различается эта пятёрка переменных токов только одной второстепенной, казалось бы, подробностью — токи изменяются по-разному. Какие-то токи меняются резко, скачкообразно, какие-то более плавно, постепенно. Есть в наборе два тока, очень похожих по характеру изменения, но только один ток из всей пятёрки имеет право называться синусоидальным (Р-60.5) — он меняется с течением времени именно так, как меняется длина линии синуса при изменении угла а в известном геометрическом построении (Р-67).

Мы ещё раз повторим это уже известное читателю утверждение ввиду его исключительной важности. Всё, что до сих пор говорилось о переменном токе, о его мгновенных и эффективных значениях, фазовых сдвигах, индуктивных, ёмкостных и комплексных сопротивлениях, все законы переменного тока, приведённые для него расчётные формулы и векторные диаграммы — всё это действительно только для

синусоидального тока и только для него. Для переменных токов, у которых иной характер изменения, всё, что было рассказано до сих пор, недействительно. Для них нужна была бы совсем другая наука об электричестве, причём для каждого своя.

Невесёлое сообщение сделано совсем не для того, чтобы огорчить читателя. Это было всего лишь необходимое предисловие к приятному сообщению: есть сравнительно простой приём, позволяющий накопленные при работе с синусоидальным током знания применить и для несинусоидальных переменных токов.

Т-145. **Спектр переменного тока сложной формы — это эквивалентный ему набор синусоидальных токов с разными частотами и амплитудами**. Для того чтобы правила, законы, расчётные формулы, векторные диаграммы и другие наработки для синусоидального тока применить к переменному току иной формы, проще всего этот «неправильный ток» представить как сумму синусоидальных токов — синусоидальных составляющих. Тогда можно будет с каждой из них работать по известным для синусоидального тока законам и правилам, а затем, при необходимости, просуммировать полученные результаты. Эта сумма результатов покажет, что происходит со сложным током в целом.

Итак, первая задача — для какого-либо переменного тока сложной формы нужно найти набор синусоидальных составляющих, сложив которые, мы получим этот исходный сложный «неправильный» переменный ток. Сразу же сообщим, что такой набор синусоидальных составляющих какого-либо сложного тока — это его спектр. Слово это происходит от латинского «спектрум», что означает «видимый, видение», и используется очень широко. Мы говорим о спектре человеческих характеров (основные типы характера), о спектре звука (слышимые синусоидальные составляющие реальной речи или музыки), о спектре массы летательных аппаратов (от лёгкого дельтаплана массой несколько килограммов до орбитальной станции в несколько тысяч тонн) и тому подобном.

ВК-168. *Одно из достоинств кислотных (свинцовых) аккумуляторов, применяемых в автомобилях, состоит в том, что они допускают довольно большой разрядный ток — до 150 ампер. Именно столько (особенно в зимнее время) может потреблять электродвигатель (стартёр), который заводит автомобиль. У многих химических источников тока разрядный ток строго ограничен, и значительное превышение этой величины может привести к серьёзным неприятностям, вплоть до быстрого разрушения аккумулятора.*

Р-64. СОПРОТИВЛЕНИЯ x_L И x_C ЗАВИСЯТ ОТ ЁМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА, ИНДУКТИВНОСТИ КАТУШКИ И ЧАСТОТЫ. Довольно простые расчётные формулы (1, 2) и тем более графики (3, 4, 5, 6) наглядно поясняют, от чего зависят реактивные сопротивления. Но зависимость эта разная. Так, индуктивное сопротивление катушки растёт с увеличением её индуктивности и с ростом частоты. А ёмкостное сопротивление наоборот — оно уменьшается с ростом ёмкости и увеличением частоты.

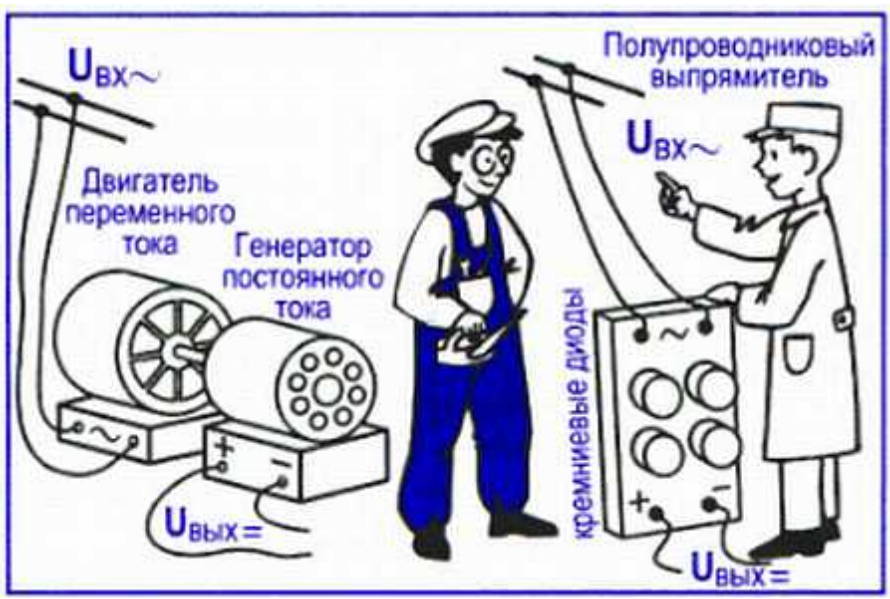
Для начала попробуем решить нашу первую задачу в другой области. Предположим, что нам нужно, пользуясь картой, измерить площадь какого-нибудь моря, например Каспийского (Р-68). Проще всего, наверное, это можно сделать следующим образом: на карте всю территорию моря покрыть квадратами разных размеров, подобрать их размеры и количество так, чтобы собранная из этих квадратов фигура как можно более точно представила сложную конфигурацию берегов и всей поверхности моря. Затем можно точно подсчитать площадь каждого квадрата, просуммировать все эти площади и получить таким образом с вполне приличной точностью площадь всей морской поверхности. На карте разместится какое-то количество больших квадратов, несколько квадратов поменьше и, наконец, множество мелких и мельчайших квадратиков, которые точно воспроизведут сложные очертания морских берегов.

С помощью набора стандартных составляющих (квадратов) можно измерить площадь самых разных геометрических фигур, имеющих сложные очертания. И у каждой такой фигуры будет свой собственный набор квадратных составляющих, её геометрический спектр. В качестве стандартных, единых составляющих этого спектра мы выбрали квадрат, но с таким же успехом можно было договориться и сложить изображение Каспийского моря из разного размера однотипных кружков, прямоугольников, ромбов или треугольников — выбрать можно то, что удобнее.

То, что сложную геометрическую фигуру можно сложить из квадратиков разной величины, ясно и без особых доказательств. А вот можно ли подобную операцию суммирования произвести с электрическими составляющими — с синусоидальными токами разных частот? Можно ли считать, что сложный ток состоит из определённого набора простых синусоидальных токов? Оказывается, можно.

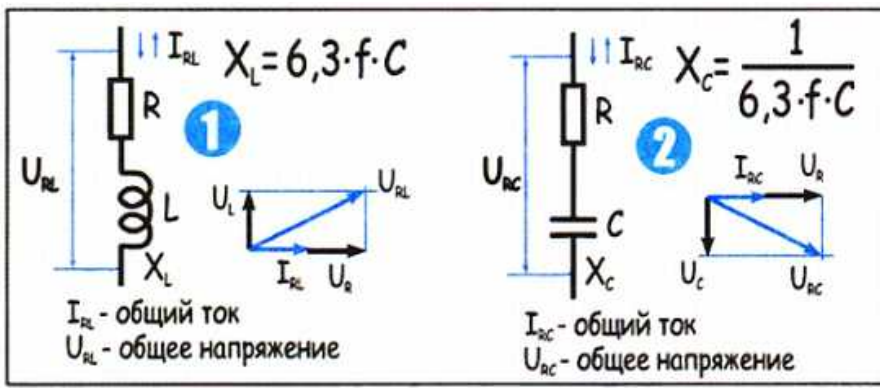
Если в электрическую цепь пустить несколько переменных токов от разных генераторов, то ни измерительные приборы, ни сама нагрузка, ни электроны в проводниках не поймут (Т-8), что работает несколько генераторов. Измерительные приборы, нагрузка, электроны в цепи будут вести себя так, будто в цепи действует единая, суммарная электродвижущая сила. И происходит это потому, что разные электрические силы, разные электрические поля, действующие в какой-либо точке пространства, действуют совместно, складываются, и в получившемся общем, в суммарном поле уже неразличимы отдельные его слагаемые, отдельные создавшие его поля.

При определении площади Каспийского моря в качестве стандартной геометрической составляющей мы выбрали квадрат, поскольку очень просто подсчитать его площадь. В качестве стандартной составляющей для получения спектра сложных токов выбираем синусоиду, поскольку все основные законы цепей переменного тока действительны именно для неё. Кроме того, примерно 200 лет назад французский математик Жан Батист Жозеф Фурье нашёл способ вычислять синусоидальные составляющие спектра (их амплитуду, частоту, фазу) для графиков сложной формы. И, наконец, радиотехника умеет не мысленно, а по-настоящему извлекать из спектра каждую его синусоидальную составляющую.



ВК-169. *Электрические сети уже давно перешли на переменный ток. И если кому-то нужна была значительная мощность*

постоянного тока, её получали с помощью машинных преобразователей. В простейшем случае это выглядело так: ротор генератора постоянного тока вращал подключённый к сети электродвигатель переменного тока. Сейчас это делается иначе: постоянный ток достаточно большой мощности получают, выпрямив переменный ток с помощью мощных полупроводниковых диодов.



Р-65. ДВА МАСТЕРА ИЗ РАЗНЫХ КЛУБОВ. Если вам когда-либо придётся соединить последовательно активное сопротивление **R** с конденсатором **C** или катушкой индуктивности **L**, то не пробуйте, подсчитав $\mathbf{X_C}$ или $\mathbf{X_L}$, просто сложить одно из них с сопротивлением **R** — верный результат так не получится. Для начала заметим, что по всем участкам последовательной цепи идёт один и тот же ток — уже объяснялось, почему иначе быть не может (Р-32). С током, идущим по **R**, совпадает по фазе напряжение $\mathbf{U_R}$ на активном сопротивлении, от него, как и следовало ожидать, отстаёт на 90 градусов напряжение на конденсаторе. И, наконец, напряжение $\mathbf{U_{RC}}$ — сумма векторов $\mathbf{U_R}$ и $\mathbf{U_C}$, диагональ образованного ими прямоугольника.

Точно так же можно получить и сложить векторы $\mathbf{U_R}$ и $\mathbf{U_L}$, узнав таким образом общее напряжение $\mathbf{U_{RL}}$ на включённых последовательно сопротивлении **R** и катушке индуктивности **L**.

Спектр какого-либо сложного тока обычно представляют на особом графике, где по горизонтальной оси откладывается частота/, а по вертикальной — амплитуда той или иной составляющей. График спектра периодически повторяющегося

сложного тока напоминает частокол, где каждая вертикальная прямая отображает одну из синусоидальных составляющих (Р-68).

Кстати, Фурье установил, что если сложный процесс периодически повторяется, то его спектр состоит из синусоидальных составляющих с кратными частотами. Музыканты называют их «обертоны», радисты используют название «гармоника», имея в виду известное название синусоиды «гармоническая зависимость». Если, например, частота сложного тока $f = 50$ Гц, то в его спектр, скорее всего, войдут составляющие (гармоники) с частотами $f = 50$ Гц, $2f = 100$ Гц, $3f = 150$ Гц, $4f = 200$ Гц и так далее. Амплитуды гармоник могут быть самые разные, это зависит от сложного тока, но, как правило, с увеличением частоты гармоник их амплитуда убывает.

При хаотически меняющемся сложном токе и тем более при одиночных его всплесках появляется значительно больше гармоник, часто даже говорят о сплошном спектре. Это значит, что какую частоту ни пробуешь извлечь из спектра — она там есть. И ещё одна интересная подробность: если график сложного тока асимметричен относительно горизонтальной оси, если ток во время одного полупериода работает больше, чем во время второго, то в спектре этого тока появляется постоянная составляющая — определённой силы постоянный ток I_0. Этот ток I_0 единственная несинусоидальная составляющая в спектре.

Т-146. **Посторонние переменные токи могут создавать помехи и искажать информацию, которую переносят электрические сигналы.** Забегая вперёд, сообщим то, что кое-кому уже известно. Переменный ток, с которым мы встречаемся чаще всего, то есть тот, что с электростанции по электрическим сетям приходит в наши дома, в заводские цеха и школьные классы, — это синусоидальный ток. По крайней мере, таким он был создан мощными генераторами на электростанции. Но иногда по пути синусоидальный характер этого тока искажается, и, следовательно, в его спектре появляются какие-то дополнительные составляющие.

Более того, в определённых случаях сетевой ток искажают преднамеренно, специально. Чаще всего это делают, когда из переменного напряжения нужно получить постоянное, например, для питания поездов метро или подмены батарейки в переносном приёмнике. Для этого в цепь переменного тока вводят электрический вентиль — элемент, который пропускает ток только в одну сторону.

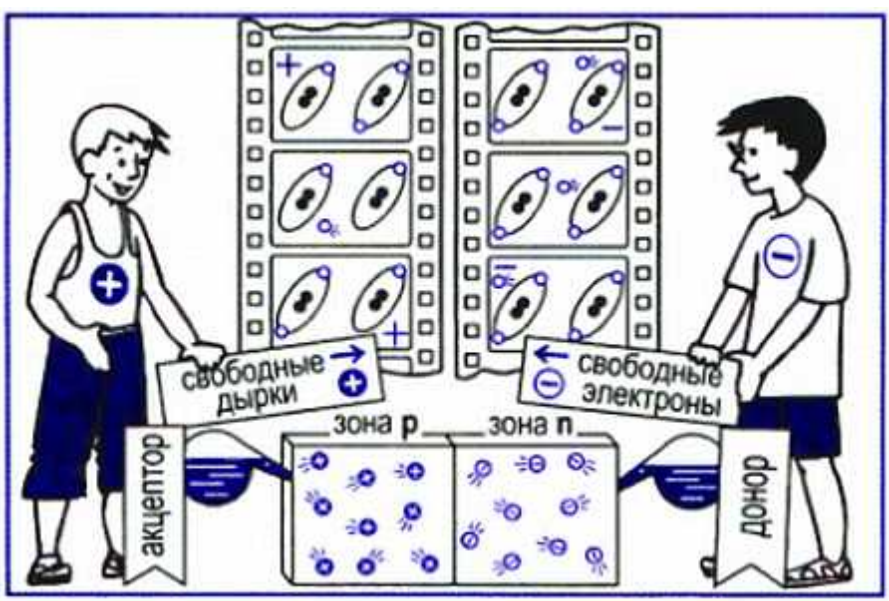
В электрических сетях один из главных источников нежелательных посторонних токов — скользящие и некоторые

иные контакты, особенно контакты, между которыми проскакивает искра. Кстати, искра не только результат какой-либо неисправности, в некоторых устройствах это ещё и нормальный, работающий процесс, как, например, в свече автомобильного или иного бензинового двигателя. С электрической искры начиналась вся радиотехника — искра, а затем и электрическая дуга долгое время были источниками высокочастотных токов, именно они, попав в передающую антенну, излучают радиоволны. А появляются в искре эти высокочастотные токи потому, что сам искровой ток беспорядочно меняется и в его спектре много гармоник самых разных частот.

Примерно то же самое происходит в цепи скользящего контакта, например, подающего напряжение на обмотку электродвигателя.

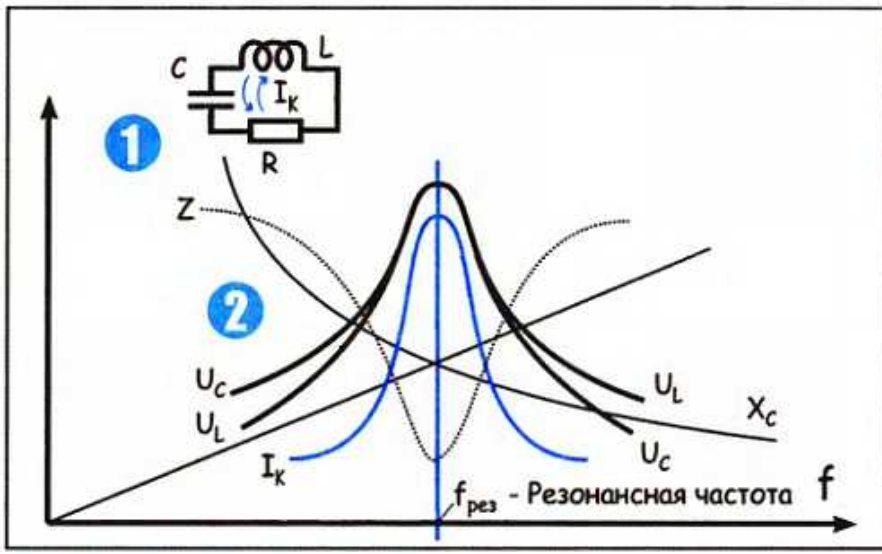
Идеальным такой контакт быть не может, при его скольжении контактное сопротивление хоть чуть-чуть, но меняется, вместе с ним хаотично меняется ток, порождая множество гармоник.

Как уже отмечалось, эффективно подавить ненужные переменные токи помогают электрические фильтры.



ВК-170. *Основа полупроводникового диода — кремниевый или германиевый кристалл. Введением примесей, одна из которых добавляет электроны (примесь — донор), а другая отбирает их (примесь-акцептор), в кристалле создают две примыкающие друг другу зоны: зону* ***p*** *(от латинского positivus — «положительный») со*

свободными положительными зарядами по имени «дырки» (+) и зону ***n*** *(от латинского negativus — «отрицательный») со свободными электронами (—). Граница между зонами называется* ***pn****-переход.*



P-66. РАБОТАЕТ ЧАСТОТА. Прежде всего отметим, что на этом рисунке имеется простейшая цепь (1) из конденсатора **C**, катушки индуктивности **L** и активного сопротивления **R**. Обычно такую цепь называют колебательный контур, или резонансный контур, или, наконец, просто контур. Первые два названия будут вскоре пояснены (P-73), а третьим мы будем пока пользоваться без всяких пояснений.

Основа рисунка — большой график (2), показывающий, как с изменением частоты **f** (горизонтальная ось) меняются различные характеристики нашего LCR — контура (вертикальная ось). Для начала, вспомнив знакомый рисунок (P-64.3, P-64.5), отметим, что с ростом частоты **f** увеличивается индуктивное сопротивление $\mathbf{X}_L$ в контуре и уменьшается ёмкостное $\mathbf{X}_C$. Затем, тоже вспомнив знакомый рисунок (P-59.3, P-59.6), отметим, что эти сопротивления действуют друг против друга, так как напряжение на катушке опережает ток на 90°, а на конденсаторе отстаёт от тока на 90°, то есть эти напряжения сдвинуты на 180° (3). На сравнительно низких частотах, когда $\mathbf{X}_C$ больше, чем $\mathbf{X}_L$, напряжение на конденсаторе $\mathbf{U}_C$ больше, чем $\mathbf{U}_L$

на катушке, ток во всей цепи одинаковый и напряжение генератора делится пропорционально сопротивлениям, какое из них больше, тому и напряжение достаётся побольше. На сравнительно высоких частотах, когда $\mathbf{X}_L$ больше, чем $\mathbf{X}_c$, напряжение $\mathbf{U}_L$ оказывается больше, чем $\mathbf{U}_c$.

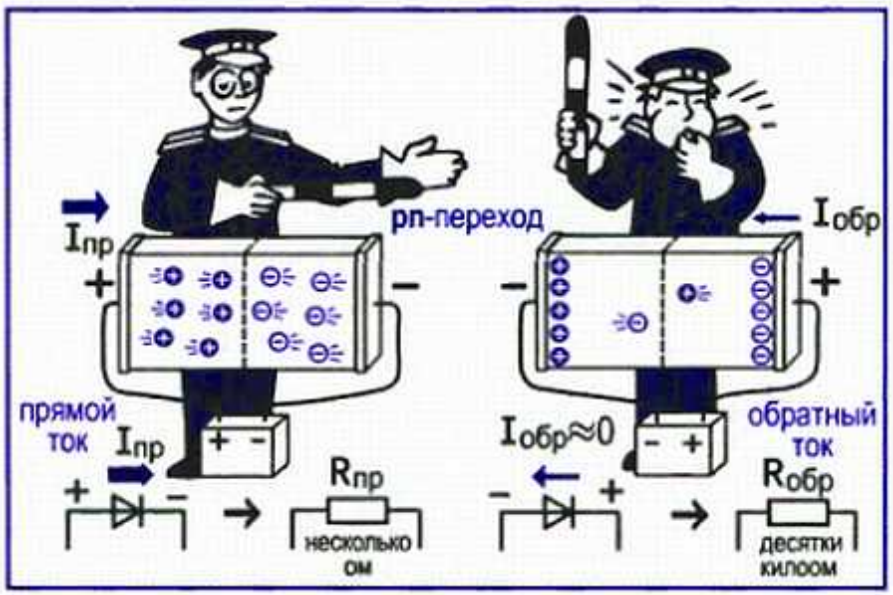
Нечто особое происходит на частоте, которую обозначают $\mathbf{f}_{рез}$, или $\mathbf{f}_0$, и называют резонансная частота. На этой частоте сопротивления $\mathbf{X}_L$ и $\mathbf{X}_c$ оказываются одинаковыми, они полностью компенсируют друг друга (3), и общее сопротивление **Z** контура резко уменьшается до очень небольшой величины **R**. Никто обычно не включает в контур резисторы, и в **R** входит небольшое сопротивление провода, которым намотана катушка. Итак, на резонансной частоте резко возрастает ток в контуре и вместе с ним и напряжения $\mathbf{U}_L$ и $\mathbf{U}_c$ на катушке и конденсаторе, также ставшие равными из-за равенства сопротивлений $\mathbf{X}_L$ и $\mathbf{X}_c$.

Т-147. **С помощью конденсаторов и катушек можно создавать фильтры — электрические цепи, которые по-разному пропускают токи разных частот**. Сопротивление реактивных элементов (конденсатора и катушки) зависит от частоты. Эта их особенность может оказаться весьма нежелательной в тех случаях, когда по цепи с конденсатором и катушкой идут переменные токи разных частот и нужно создать для всех этих токов равные условия. То есть когда нужно пропускать эти токи, никому не отдавая предпочтения — одинаково хорошо или одинаково плохо, но, главное, одинаково. Конденсатор или катушка, разумеется, не допустят такой одинаковости — по-разному сопротивляясь токам разных частот, конденсатор и катушка в разной степени будут ослаблять эти токи. Профессионалы об этом говорят так: конденсаторы и катушки — источники частотных искажений.

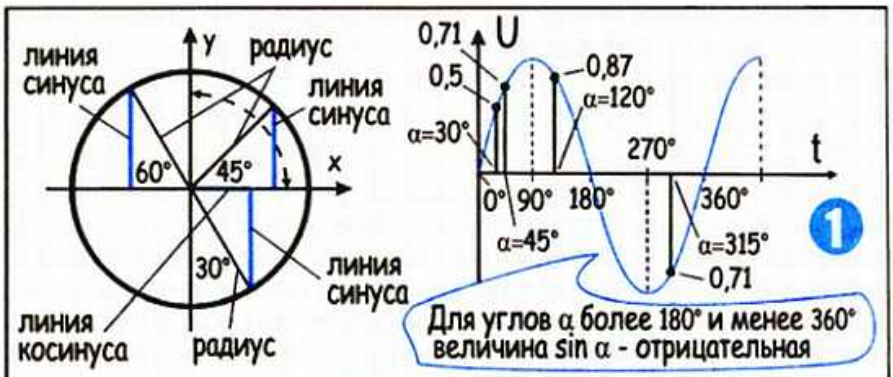
Но зато только реактивные элементы, только конденсаторы и катушки могут разделить токи разных частот, протекающие в общей цепи, или отделить постоянный ток от переменного. Здесь реактивные элементы просто незаменимы, только у них развито «чувство частоты», только конденсатор и катушка оказывают разное сопротивление токам разных частот.

Цепи, в которых происходит сортировка и разделение токов разных частот, называются фильтрами (Р-69). Обычно это не очень большие цепи, чаще всего они состоят из нескольких

элементов, в числе которых, конечно, конденсатор или катушка или оба реактивных элемента одновременно. Схемы фильтров разнообразны, но в них всегда используются одни и те же принципы, которые можно хорошо увидеть на простейших примерах.



ВК-171. *Если диод подключён к батарее так, что заряды идут к* ***pn****-переходу, то их «плюс» и «минус» как бы нейтрализуют друг друга, и в переход приходят всё новые и новые заряды — через диод и во всей цепи идёт ток. Если сменить полярность батареи, то заряды оттянутся от* ***pn****-перехода, сопротивление диода резко возрастёт и ток в цепи практически прекратится. А отсюда вывод: полупроводниковый диод обладает односторонней проводимостью, он пропускает ток только в одну сторону.*



угол α	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
угол α	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345	360
sin α	0,0	0,26	0,5	0,71	0,87	0,97	1,0	0,97	0,87	0,71	0,5	0,26	0

Р-67. ВЕЛИКОЕ ДЕЛО СПРЯТАНО В МИКРОТАБЛИЦЕ. Мы так подробно говорим о синусоиде потому, что переменный ток, который производит электроэнергетика — это синусоидальный ток, он меняется 50 раз в секунду (это частота переменного тока, принятая в нашей стране и не только в ней; в США, Великобритании, Индии и других странах частота немного больше — 60 полных изменений в секунду). Причем ток в сети (э.д.с., напряжение) меняется точно так же, как меняется длина линии синуса (1) при вращении радиуса в круге. Тем, кто занимается переменным током, полезно иметь таблицу значений sin a для разных углов a. Упрощённый вариант такой таблицы (2) приведён на рисунке, для углов от 180 до 360 градусов, все значения sin a — отрицательные, так отмечается и то, что ток сменил направление.

Фильтры бывают параллельные и последовательные. В последовательных фильтрах реактивный элемент вместе с нагрузкой образует делитель напряжения, и чем больше сопротивление реактивного элемента (конденсатор, катушка), тем меньшая часть общего напряжения достаётся нагрузке. Поэтому в простом последовательном RC-фильтре с увеличением частоты напряжение на нагрузке растёт, а в RL-фильтре — падает. То есть последовательный ёмкостный фильтр ослабляет низкие

частоты и пропускает высокие, а индуктивный — наоборот.

В параллельном RC-фильтре конденсатор шунтирует нагрузку тем сильнее, чем выше частота. То есть конденсатор фильтра отводит от нагрузки переменные токи более высоких частот. У параллельного RL-фильтра с ростом частоты индуктивное сопротивление катушки растёт, и она всё меньше шунтирует нагрузку. Иными словами, такой фильтр отводит от нагрузки токи сравнительно низких частот, и ей достаются в основном высокочастотные токи.

В выпрямителе, для того чтобы пропустить к нагрузке только постоянную составляющую, используют параллельный фильтр с конденсатором и последовательный с катушкой. Первый из них шунтирует нагрузку, отводит от неё переменный ток, второй не пропускает его к нагрузке. Чтобы лучше очистить постоянную составляющую от переменных токов, нередко используют многозвенные фильтры с *R*-, *C*- и *L*-элементами.

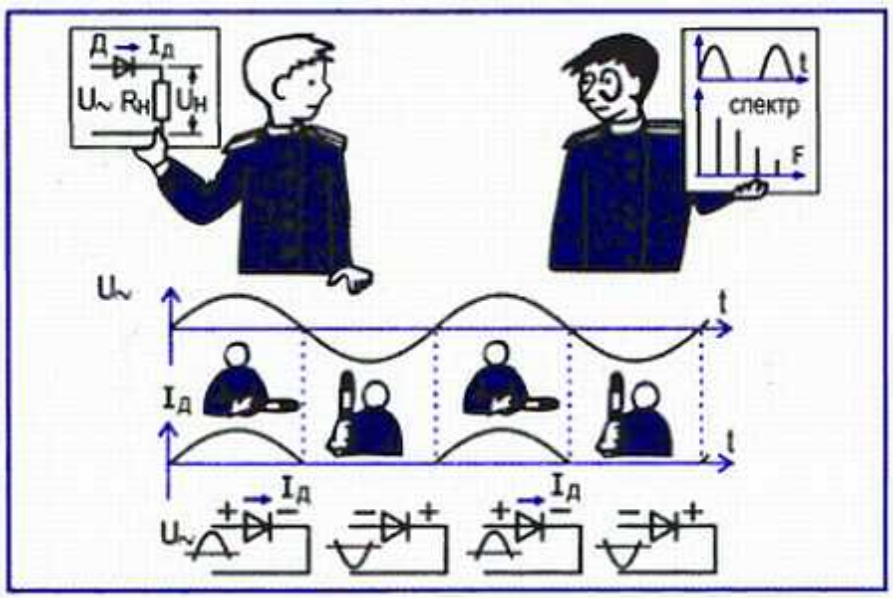
При выборе элементов фильтра, конечно, учитывается частота, на которой он должен работать. Так, например, если фильтр очищает от переменных составляющих выпрямленный сетевой ток, то конденсаторы должны иметь малое ёмкостное сопротивление на частоте 50 Гц, а для этого у них должна быть весьма большая ёмкость — десятки и сотни микрофарад. На высоких частотах (килогерцы, мегагерцы) ёмкость фильтра, как правило, может быть в сотни и тысячи раз меньше.

Т-148. **Частотная характеристика — график, рассказывающий о том, как ведёт себя электрическая цепь на разных частотах**. Представим себе, что в нашем распоряжении есть измерительный генератор переменной э.д.с., частоту которой можно плавно изменять поворотом ручки. Так же, например, как поворотом ручки мы меняем громкость звучания в приёмнике. Такие генераторы реально существуют, это широко распространённые приборы электротехнической и электронной лаборатории.

Если подключить к нашему измерительному генератору делитель напряжения из двух активных сопротивлений, то на всех частотах он будет делить общее напряжение $U_г$ (напряжение, поступающее от генератора) в одной и той же пропорции. А вот в делителях, куда входят реактивные элементы (конденсатор и катушка), напряжение будет по-разному делиться на разных частотах, такие делители как раз и используются в качестве электрических фильтров. Об их поведении рассказывает график, который называется «частотная характеристика» — он показывает, как с изменением частоты меняется напряжение на элементах фильтра при неизменном напряжении на его входе. По

схеме фильтра нетрудно представить себе его частотную характеристику и возможности использования.

В отличие от фильтров, которые по-разному будут вести себя на разных частотах, есть электрические и электронные устройства, у которых создана идеальная частотная характеристика — горизонтальная линия. Именно такую частотную характеристику желательно иметь, в частности, в усилителях звука — они должны одинаково хорошо передавать все звуковые частоты, не ослаблять басы контрабаса или высокие звуки флейты в звучании симфонического оркестра.

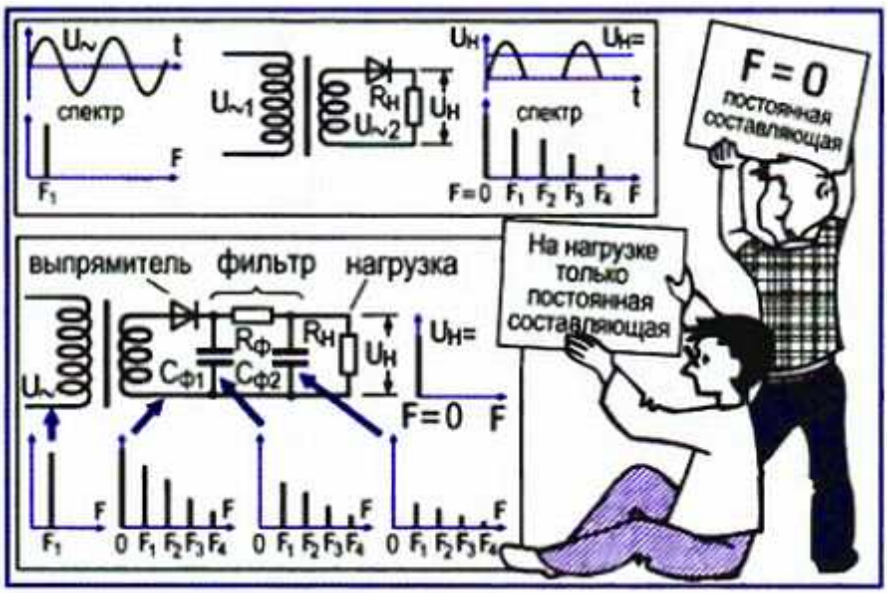


ВК-172. *Если подвести к диоду переменное напряжение, то дважды в течение периода его полярность будет меняться, и диод будет пропускать ток только в течение одного полупериода. Иными словами, под действием переменного напряжения через диод из-за его односторонней проводимости пойдёт пульсирующий ток. Этот пульсирующий ток имеет уже довольно сложный спектр, то есть он может быть представлен в виде суммы синусоидальных составляющих, и в их числе постоянная составляющая (f = 0).*

Т-149. **Коэффициент передачи показывает, во сколько раз напряжение или ток на выходе больше или меньше, чем на входе.** Не вдаваясь в устройство какого-либо фильтра, нарисуем его в виде прямоугольника и для определённости будем считать, что при входном напряжении $U_г$ = 10 В выходные напряжения на частотах 3 и 5 кГц соответственно равны 2 и 8 В. Приведённые

цифры показывают, что есть смысл ввести ещё одну важную характеристику фильтра, да и вообще любого элемента электрической цепи или всей этой цепи в целом. Эта характеристика — коэффициент передачи *K*, он в данном случае сообщает, что конкретно происходит на частотах 3 и 5 кГц. Коэффициент *K* указывает соотношение между выходным и входным напряжением, он составляет 0,2 (для 3 кГц) и 0,8 (для 5 кГц). В каких-то случаях *K* может быть больше единицы, если, например, происходит усиление электрического сигнала.

T-150. **Децибел — универсальная единица, показывающая, во сколько раз какая-либо величина больше или меньше другой.** В каких единицах нужно измерять коэффициент передачи? Вполне подошла бы для этого единица «раз» или хорошо известные проценты. Ведь мы так и говорим: «На частоте 3 кГц напряжение ослабляется в 5 раз, на частоте 5 кГц — в 1,25 раза». Однако чаще используется не «раз», а другая единица — децибел, сокращённо дБ, она названа так по имени изобретателя телефона Александра Белла.



ВК-173. *Появление постоянной составляющей в спектре пульсирующего тока можно объяснить очень просто. Этот ток появляется с перерывами, но движется всегда в одну сторону. Именно это движение отображает постоянная составляющая — постоянный ток (f = 0), без которого спектр был бы неверным. Можно с помощью фильтра отделить постоянную составляющую от переменных — для них нужно создать лёгкий и короткий путь*

через конденсаторы, а для него через резистор $R_ф$ к нагрузке $R_н$.

Децибел — единица универсальная, она применяется для того, чтобы показать отношение любых двух величин: напряжений, токов, давлений, мощностей и других. Переход от характеристики «во столько-то раз» к децибелам и обратно проще всего произвести с помощью справочной таблицы, один из очень простых вариантов которой помещён на рисунке Р-70. Если коэффициент передачи меньше единицы, то есть если фильтр или другой элемент цепи уменьшает напряжение (ток), то децибелы получаются отрицательные. А если коэффициент передачи больше единицы, то есть если выходное напряжение (ток) больше входного, то децибелы положительные.

Особо нужно сказать о том, как в справочной таблице выражено соотношение мощностей. Между мощностью и током, а также между мощностью и напряжением существует квадратичная зависимость. То есть если увеличить напряжение или ток на каком-то участке цепи в два раза, мощность возрастёт в четыре раза. Эта зависимость как раз и находит отражение в таблице: во сколько бы раз ни изменилось напряжение (ток), мощность изменится в то же число раз, возведённое в квадрат.

Децибел — единица логарифмическая, и с этим связаны её многие достоинства. Так, например, если вы знаете, что один фильтр ослабляет переменное напряжение на 20 дБ, а затем оно поступает на другой фильтр и там ослабляется ещё на 30 дБ, то общее ослабление подсчитывается как сумма (-20) + (-30) = -50 дБ. По приведённой справочной таблице легко определить, что напряжение в этом случае ослабляется в 316 раз и мощность в 10 000 раз.

Во многих областях электрической техники, в частности в телефонии, звукоусилении, телевидении, дальней связи, радиоприёме, широко используется оценка коэффициента передачи в децибелах, профессионалы привыкли к ним, как мы привыкли к метрам или килограммам.

Обогатившись представлением об измерительном генераторе, коэффициенте передачи, частотной характеристике и оценке уровня в децибелах, мы легко можем перейти к знакомству с особым фильтром, без которого не обходятся радиосвязь, сотовый телефон, телевидение, радиолокация, телефония больших дистанций и многие другие области работающего электричества.

Глава 14
В мире качающихся маятников

Физические, химические, биологические и иные процессы могут протекать по-разному. В одних случаях мы видим нарастание какой-либо величины: нарастает скорость взлетающей ракеты, температура поставленного на плиту чайника с водой, вес зреющего на поле арбуза. В других случаях наблюдается уменьшение чего-либо, убывание: убывает вода в дырявом ведре, напряжение пружины в заведённых часах, скорость автомобиля, у которого на ровной дороге вдруг заглох двигатель.

А есть ещё и такие процессы, в которых происходит непрерывная смена нарастаний и убываний, процессы, которые без всякого вмешательства извне меняют своё направление, сами по себе идут то туда, то обратно. Это так называемые свободные колебания, примером которых могут служить колебания маятника или гитарной струны.

Т-151. **Вы тронули гитарную струну, и она запела гимн свободным колебаниям.** Вы слегка оттянули гитарную струну и передали ей какую-то порцию энергии. Мы часто производим подобную передачу энергии, например, когда двигаем по столу книгу, ударяем молотком по гвоздю или ногой по футбольному мячу. В итоге отданная нами энергия частично расходуется, а частично сохраняется. Некоторые накопители энергии природа связала друг с другом особым образом, именно благодаря этой связи и возникают свободные колебания.

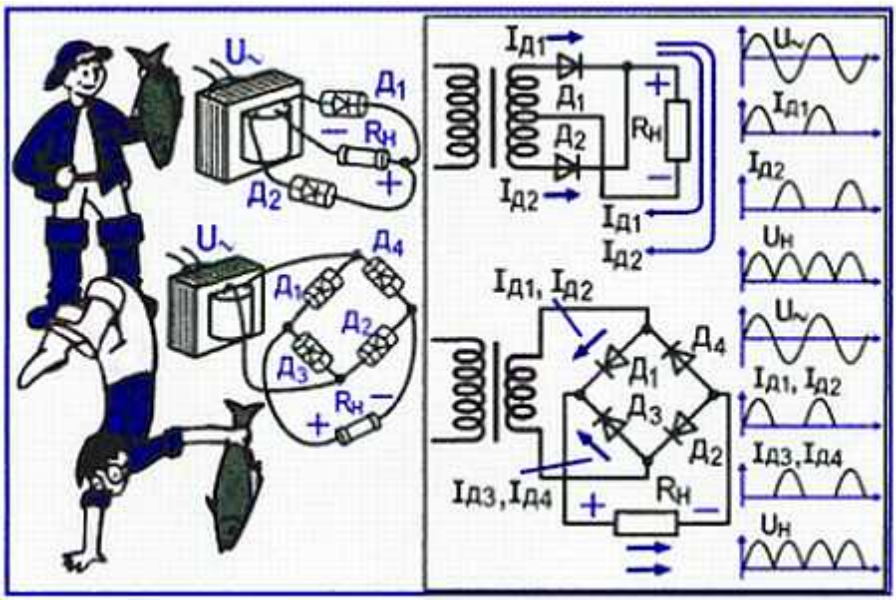
Это хорошо видно на примере маятника или струны. Когда мы оттягиваем струну, то энергию захватывает первый из двух главных накопителей — упругая деформация. Это явление сложное, оно связано с изменением внутренней структуры вещества, с его упругостью. При первой возможности струна вернётся в первоначальное своё состояние и вернёт вложенную в неё энергию.

Вернёт, но кому?

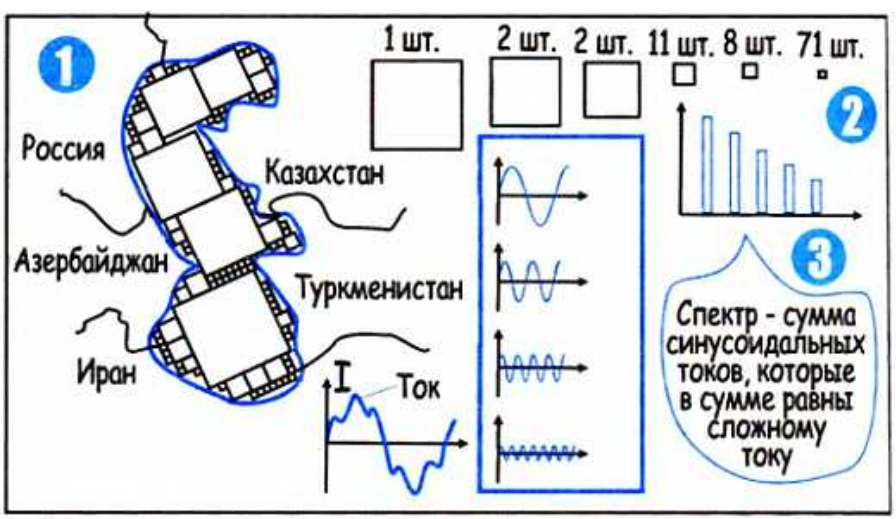
Спортсмен, который обычно прыгает в длину шесть-семь метров, не преодолеет и четырёх, если лишить его возможности разбега, заставить прыгать с места. Дело в том, что при разбеге спортсмен создаёт некоторый дополнительный запас энергии,

который в нужный момент добавляет к силе своих мускулов. Физика очень точно определяет этот дополнительный запас — это не что иное, как кинетическая энергия, ею обладает любое движущееся тело, в нашем примере бегущий человек. Чем больше масса тела и его скорость, тем больше энергетический запас, больше кинетическая энергия. Это легко поймёт тот, кому приходилось, разогнав велосипед, долгое время катиться бесплатно, за счёт накопленной кинетической энергии. Шофёры хорошо знают, что чем больше скорость автомобиля и чем сильнее он нагружен, тем труднее его остановить, то есть погасить в тормозах накопленную машиной кинетическую энергию.

Представив читателю два накопителя энергии, можно проследить за свободными колебаниями струны. Натянув струну, мы передали ей порцию энергии. Отпускаем струну, она выпрямляется и при этом набирает скорость — энергия упругой деформации постепенно переходит в кинетическую энергию, в энергию движения. Когда струна проходит среднюю, нейтральную линию, деформации уже нет, а кинетическая энергия максимальна. Из-за неё струна не может остановиться, она продолжает двигаться по инерции, кинетическая энергия вновь переходит в энергию упругой деформации, но уже при отклонении в противоположную сторону. Наконец, кинетическая энергия закончилась, струна на какое-то неуловимое мгновение остановилась и затем пошла в обратную сторону, постепенно набирая скорость. Она опять по инерции проскакивает среднюю линию, приходит в точку, откуда начинала свой путь, и всё повторяется сначала. Струна будет совершать такие свободные колебания, будет двигаться туда-обратно до тех пор, пока не израсходует всю полученную в самом начале порцию энергии, например, израсходует её на то, чтобы преодолевать сопротивление воздуха.



ВК-174. *Схема на предыдущем рисунке нередко встречается в реальных приборах. Это выпрямитель, он из переменного напряжения делает постоянное для питания электронных схем. Плохо, что он использует лишь один полупериод переменного тока, а второй просто пропадает. Но это дело поправимое. Здесь на рисунке приведены две схемы двухполупериодных выпрямителей. Для одной из них нужен трансформатор с отводом от середины вторичной обмотки, ну а вторая схема, мостовая, обходится без этого.*



Р-68. ПО МОРЯМ, по ВОЛНАМ К ПОНИМАНИЮ СПЕКТРА. В своё время математики придумали, как ток со сложной формой графика (2) представить в виде полностью эквивалентной ему (равноценной) суммы синусоидальных переменных токов (3), для которых освоены многие важные законы и правила. Такая сумма синусоидальных составляющих называется «спектр сложного тока». Спектр можно получить путём вычислений, измерений или в каких-то случаях из справочной литературы. Известно, например, что, для того чтобы получить разборчивую человеческую речь, по линиям связи нужно передать спектр синусоидальных составляющих с частотами от 200 герц до 2–3 килогерц.

Получение спектра поможет понять решение такой задачи — нужно определить площадь поверхности какого-либо моря, например Каспийского (1). Для этого на географической карте заполняем поверхность моря бумажными квадратами разной величины. Сначала крупными и средними квадратами закрываем основную поверхность моря, а затем небольшими, малыми и очень маленькими квадратиками стараемся отобразить береговые неровности. Полученный набор квадратов (2) — это своего рода спектр замысловатой поверхности водоёма. Измерив и просуммировав площадь всех квадратов, мы как раз и получим площадь поверхности моря. Точно так же электрический сигнал сложной формы представляют его спектром — эквивалентным набором синусоидальных токов разных частот.

Основа свободных колебаний — обмен энергией между двумя её накопителями, при колебаниях струны обмен между упругой деформацией и кинетической энергией. Свободные колебания весьма распространённый вид движений и в природе, и в технике. Подобно струне, совершают невидимые колебания мосты, небоскрёбы, ходит туда-обратно маятник, показывая, как потенциальная энергия поднятого над землёй тела (проще говоря, сила притяжения к Земле) переходит в кинетическую энергию, и наоборот, кинетическая энергия уходит на подъём маятника на дополнительную высоту. Открыты даже химические колебания, когда в результате определённых чередующихся реакций меняется туда-обратно концентрация определённых веществ в растворе и его окраска: красный раствор постепенно становится жёлтым, жёлтый превращается в красный, и всё это повторяется

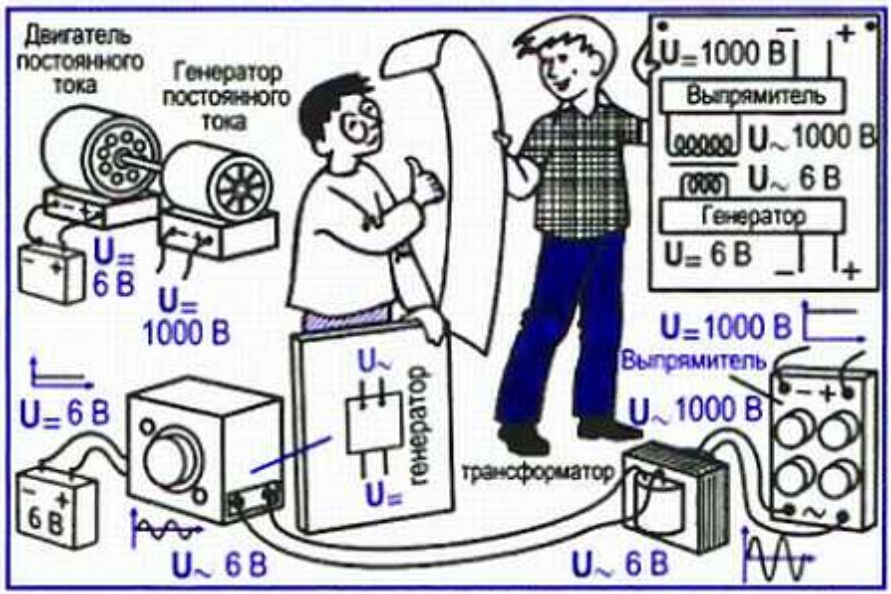
много раз.

Даже в поведении человека нередки колебания, когда есть два накопителя, два решения, между которыми приходится выбирать: идти в кино или не идти, идти или не идти, идти или не идти?

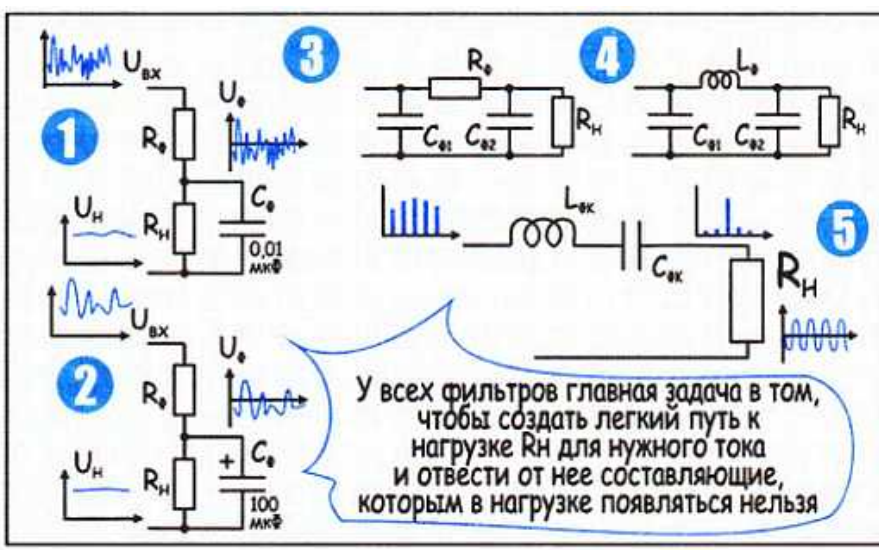
Подводя итог сказанному, мы должны отметить нечто очень важное. Свободные колебания возникают там, где есть не просто два накопителя энергии, как, например, бензиновая канистра и кофейник или падающий камень и кипящий самовар. Колебания возникают там, где есть два накопителя энергии, определённым образом связанные друг с другом, как, например, натяжение струны и движение её массы. Такие взаимосвязанные пары накопителей создаются природой или изобретателями, сумевшими найти и объединить два каких-либо физических процесса.

Т-152. **В колебательном контуре происходит обмен энергией между конденсатором *C* и катушкой индуктивности *L*.** Подключим к батарее на какое-то время конденсатор $C_к$, и он зарядится, в электрическом поле между обкладками накопится энергия, а на самих обкладках соберутся избыточные заряды. Теперь переключим конденсатор от батареи к катушке $L_к$, создадим, как его называют, колебательный LC-контур, и в нём сразу же начнутся свободные электрические колебания.

Это всё тот же обмен энергией между двумя её накопителями — в данном случае между конденсатором $C_к$ и катушкой $L_к$. Сначала конденсатор разряжается, напряжение на обкладках падает, ток через катушку нарастает, и всё больше энергии перекачивается из электрического поля в магнитное. В какой-то момент в него переходит вся энергия, полученная конденсатором от батареи, и картина чем-то напоминает маятник, который, набрав максимальную скорость, проходит через нейтральную линию и начинает отклоняться в противоположную сторону.



ВК-175. *Ещё одно схемное решение из числа тех, что неизвестные изобретатели ежегодно делают миллионами. У вас есть батарейка с постоянным напряжением 6 вольт, а аппарату нужно тоже постоянное напряжение, но 1000 вольт. Как его получить? Решение простое. Сначала с помощью транзисторного генератора превратим 6 вольт постоянного напряжения в 6 вольт переменного. Затем трансформатором повысим 6 вольт до 1000 вольт. И, наконец, выпрямим эти 1000 вольт мостовым выпрямителем.*


1
2
3
4
5
0,01 мкФ
100 мкФ
У всех фильтров главная задача в том, чтобы создать легкий путь к нагрузке Rн для нужного тока и отвести от нее составляющие, которым в нагрузке появляться нельзя

Р-69. НЕСЛОЖНЫЕ ОБЫЧНО КОМБИНАЦИИ ОТКРЫТЫХ И ЗАКРЫТЫХ ДОРОГ. Синусоидальные составляющие сложного сигнала — это не только формулы теоретиков. Эти составляющие реально выделяют, направляют по нужным путям или, наоборот, не пропускают туда, куда не нужно. Причём такие операции производят довольно простые схемы с общим названием «фильтры». Так, например, фильтр из резистора $\mathbf{R}_н$ и конденсатора $\mathbf{C}_ф$ (1) не пропускает к нагрузке $\mathbf{R}_н$ высокочастотные составляющие из спектра сложного сигнала. Элементы фильтра подобраны так, что этим составляющим легче пройти через конденсатор, чем через нагрузку. В другом таком же фильтре (2) ёмкость конденсатора в 10 000 раз больше, и поэтому он отводит от нагрузки ещё и низкочастотные составляющие. Теперь посмотрим на типичные фильтры выпрямителя (3, 4). Постоянная составляющая пульсирующего тока, который приходит от выпрямителя, через $\mathbf{R}_ф$ попадает в нагрузку $\mathbf{R}_н$ (3), а переменным составляющим намного легче замкнуться через малое для них ёмкостное сопротивление конденсаторов $\mathbf{C}_{ф1}$ и $\mathbf{C}_{ф2}$ с достаточно большой ёмкостью. Ещё больше ослабляет переменные составляющие катушка индуктивности (дроссель) $\mathbf{L}_ф$ (4). И,наконец, последняя схема (5) — резонансный фильтр $\mathbf{L}_{фк}\mathbf{C}_{фк}$, который настроен на принимаемую станцию, то есть на частоту одной из составляющих спектра сложного входного сигнала $\mathbf{U}_{вх}$.

Ток в цепи, а вместе с ним магнитное поле катушки $L_к$, проскочив своё максимальное значение, начинают уменьшаться, и при этом в катушке $L_к$ наводится э.д.с. самоиндукции, которая вновь заряжает конденсатор $C_к$, но уже в противоположной полярности — на той пластине конденсатора, где был «плюс», появляется и нарастает «минус», там, где был «минус», нарастает «плюс». Затем, перекачав себе всю энергию, которая была в магнитном поле катушки, конденсатор начинает разряжаться, в цепи нарастает ток обратного направления, конденсатор вновь перезаряжается, («плюс и «минус» оказываются там, где в самом начале их создала батарея), и всё повторяется сначала.

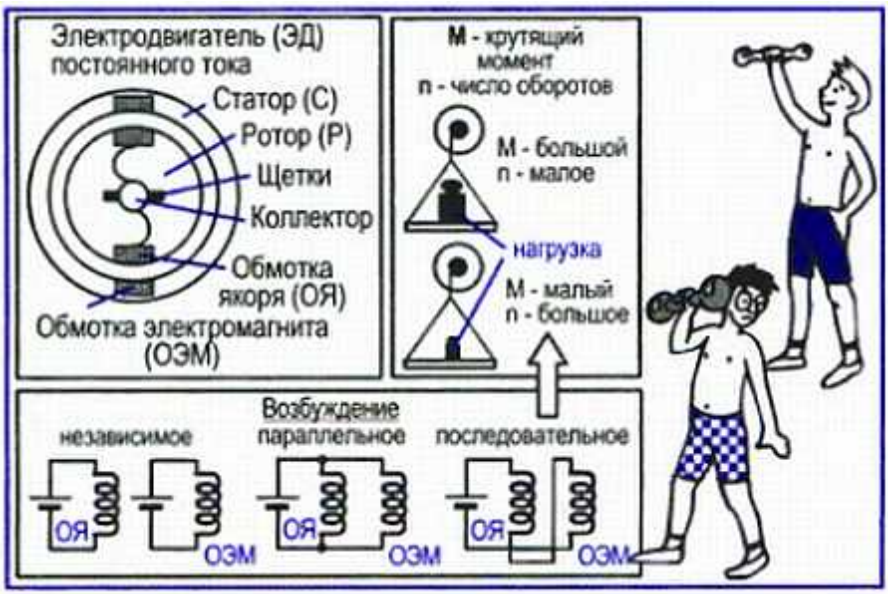
Три важных параметра характеризуют процесс свободных колебаний в контуре $L_кC_к$. Первый параметр — это период T, время, в течение которого ток в контуре проходит все свои

возможные значения, проходит полный цикл изменений. Второй параметр — частота/, число полных периодов за секунду. Единица частоты герц, сокращённо Гц, — одно полное колебание в секунду, T = 1 с (секунда). Соответственно 50 Гц — это 50 полных колебаний в секунду (T = 0,02 с). Если за секунду происходит 1000 полных колебаний, то их частота равна 1000 Гц = 1 кГц, если происходит 1 000 000 (1 миллион) колебаний за секунду — 1 000 000 Гц = 1 МГц, то есть 1 мегагерц. Частота колебаний в равной мере зависит от индуктивности $L_к$ и ёмкости $C_к$: чем больше $L_к$ и $C_к$, тем медленнее идёт обмен энергией, тем ниже частота.

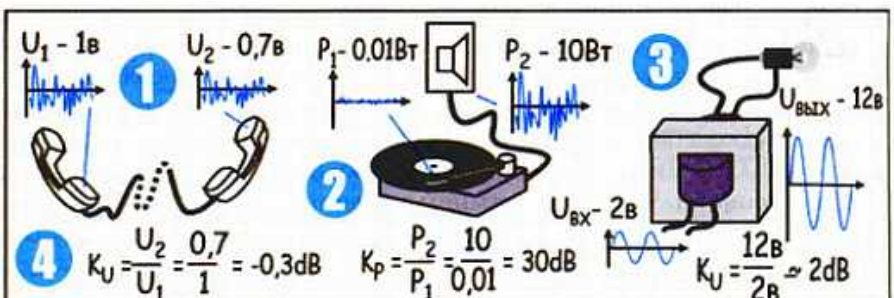
Наконец, третья важная характеристика — добротность контура *Q*, она говорит о том, какая часть запасённой энергии теряется при каждом её перекачивании из конденсатора в катушку и обратно (Р-112). Чем выше потери, тем быстрее израсходуется энергия, запасённая при зарядке конденсатора, тем быстрее затухнут колебания. При очень больших потерях колебания даже и не начнутся — конденсатор быстро отдаст всю свою энергию, причём безвозвратно, её сразу же заберёт и превратит в тепло сопротивление потерь. Потери в контуре иногда отображают двумя условными сопротивлениями (Р-112.1) — одно $R_{к2}$ включено последовательно с катушкой, второе $R_{к1}$ включено параллельно конденсатору. Чем больше $R_{к1}$ и чем меньше $R_{к2}$, тем меньше общие потери и выше добротность *Q*. Часто все потери пересчитывают в одно сопротивление $R_к$, включая его последовательно с катушкой.

Добротность *Q*, кроме того, зависит и от соотношения $L_к$ и $C_к$, об этом полезно помнить, когда подбираешь ёмкость и индуктивность контура: нужную частоту колебаний можно получить при разном соотношении ёмкости и индуктивности, но для получения высокой добротности желательно, чтобы $L_к$ было побольше, а $C_к$ — поменьше.

Свободные колебания — один из главных героев радиоэлектроники. Достаточно вспомнить, что сами радиоволны, так же как и свет или рентгеновские лучи, это свободные колебания электромагнитного поля, непрерывный обмен энергией между его электрической и магнитной составляющими. Да и сами колебательные LC-контуры — непременные схемные узлы приёмников, телевизоров, сотовых телефонов и другой аппаратуры. В сильноточной электроаппаратуре колебательные контуры встречаешь нечасто, чаще они образуются случайно, и возникающие в них свободные колебания чаще всего нежелательны.



ВК-176. *В двигателе постоянного тока обмотка электромагнита ОЭМ может получать питание от того же источника, что и обмотка якоря ОЯ. Последовательное (сериесное) соединение этих обмоток создаёт уникальные характеристики двигателя, очень ценные для транспортных машин, — при малой скорости двигатель очень сильно тянет, у него большой крутящий момент* ***М****. При большой скорости момент* ***М*** *малый. Именно поэтому в трамваях и электропоездах используют постоянный ток и сериесные двигатели.*



dB	10	20	30	40	50	60	-10	-20	-30	-40	-50	-60
$\frac{U_2}{U_1}$	3,16	10	31,6	100	316	1000	0,316	0,1	0,032	0,01	0,003	10^{-3}
$\frac{P_2}{P_1}$	10	100	1000	10^4	10^5	10^6	0,1	0,01	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}

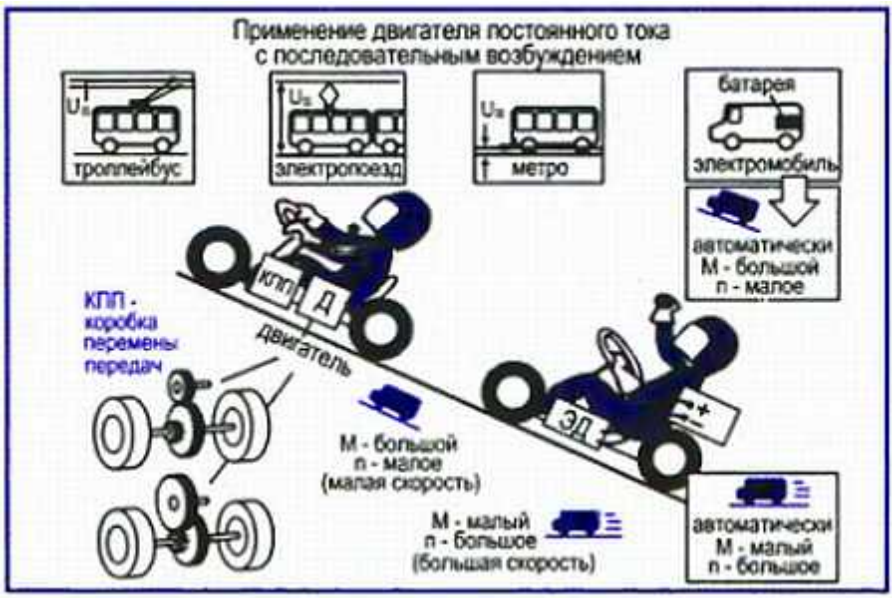
Р-70. ДЕЦИБЕЛ — ЕДИНИЦА ИЗМЕРЕНИЯ ДЛЯ ЛЮБЫХ ПРОЦЕССОВ. Энциклопедия об этой единице пишет так: «Децибел — логарифмическая единица уровней, затуханий, усиления; десятая часть бела, то есть десятичный логарифм безразмерного отношения физической величины к одноимённой физической величине, принимаемой за исходную, умноженный на десять». Ну а если пояснить суть дела, как говорится, по-простому, то можно сказать, что в децибелах чаще всего показывают, во сколько раз одна какая-либо величина больше или меньше другой. Для того чтобы от этого самого «во сколько раз» перейти к децибелам или, наоборот, по названному числу децибел узнать соответствующее им «во сколько раз», проще всего пользоваться приведённой на этом рисунке таблицей (4) или другой более подробной таблицей такого же типа. Так, например, если вы знаете что ваш усилитель поднимает напряжение сигнала в 100 раз, то по таблице можете узнать, что он усиливает напряжение на 40 децибел. Здесь уместно отметить, что наша таблица разделена на две части. В левой положительные значения децибел говорят о повышении напряжения **U** (или тока 7) и отдельно мощности **P**; в правой части таблицы отрицательные значения децибел говорят об ослаблении напряжения **U** (тока **I**) и отдельно мощности **P**. Для мощности понадобилась отдельная строка потому, что она зависит от квадрата напряжения или квадрата тока. Перед таблицей приведено несколько построенных с её помощью рисунков, иллюстрирующих снижение громкости звучания голоса в телефонной системе (1), повышение звуковой мощности в системе звукозаписи (2) и повышение напряжения с помощью повышающего трансформатора (3).

Т-153. **В последовательной LCR-цепи индуктивное сопротивление действует против ёмкостного.** Для начала извлечём из памяти три уже установленные истины. Первое: во всех элементах последовательной цепи течёт один и тот же ток. Второе: переменное напряжение на конденсаторе отстаёт от тока на 90°. Третье: напряжение на катушке опережает ток в ней на 90°.

Если, обогащённые этими воспоминаниями, мы взглянем на последовательную цепь LCR (Р-66), то увидим, что напряжение на

катушке U_L и напряжение U_c на конденсаторе сдвинуты по фазе на 180°. То есть они противофазны, действуют друг против друга. Напряжения U_L и U_c зависят от соответствующих реактивных сопротивлений X_L и X_c и от величины тока, который по ним проходит. И следующий вывод: всё, что происходит в последовательной LCR-цепи, прежде всего зависит от частоты f переменного тока, она определяет соотношение сил главных героев — индуктивного и ёмкостного сопротивлений X_L и X_c.

T-154. **На резонансной частоте сильно падает общее сопротивление последовательной LCR-цепи, и ток в ней резко возрастает**. Попробуем подключить к последовательной LCR-цепи генератор с изменяемой частотой и будем постепенно её увеличивать. При этом индуктивное сопротивление X_L тоже будет увеличиваться, а ёмкостное X_c — постепенно уменьшаться (Р-64). На какой-то частоте — давайте сразу же назовем её резонансной частотой $f_{рез}$ — сопротивления X_L и X_c станут равными и, значит, уравняются напряжения U_L и U_c. А так как эти напряжения противофазны, то на частоте $f_{рез}$ они полностью скомпенсируют друг друга, и генератор вообще перестанет чувствовать присутствие реактивных элементов, перестанет отдавать им часть своей э.д.с. На резонансной частоте резко уменьшится общее сопротивление цепи Z, и не просто уменьшится — X_L и X_c полностью нейтрализуют друг друга, реально в цепи действует только одно активное сопротивление $R_к$. В итоге ток I совпадает по фазе с общим напряжением, из-за очень малого $R_к$ ток резко возрастёт и столь же резко увеличатся напряжения U_L и U_c. Но заметьте, увеличится каждое из них в отдельности, а общее суммарное напряжение на обоих реактивных элементах, как уже говорилось, будет равно нулю.



ВК-177. *Сериесный двигатель сам автоматически делает то, что в грузовиках и легковых автомобилях делает водитель, переключая коробку перемены передач КПП. При подъёме, например, он включает шестерни (между двигателем и колёсами), понижающие скорость и повышающие силу вращения колёс* ***М****. При движении по ровной дороге включаются шестерни, повышающие скорость и снижающие М. Разработчики электромобилей уверены, что перейдут на сериесные двигатели и избавятся от КПП.*

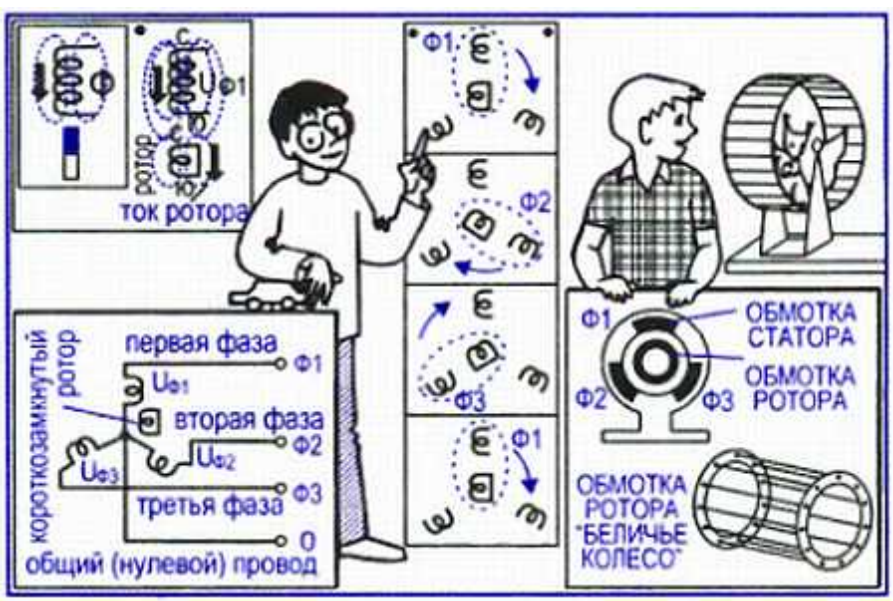
Весь этот процесс называется последовательным резонансом, или резонансом напряжений. Если после резонанса продолжать увеличивать частоту, то X_L станет больше, чем X_C, и в цепи в основном начнёт действовать индуктивное сопротивление, ток уменьшится, а вместе с ним уменьшатся и напряжения U_L и U_C.

Как видите, в последовательной LCR-цепи на особом положении оказывается только резонансная частота $f_{рез}$, и из всех переменных токов контур особо выделяет ток именно этой частоты. Выделяется, правда, не строго одна определённая частота, а сравнительно узкая полоса близких частот, но частоты, далёкие от резонансной, в буквальном смысле слова подавлены.

При этом важную роль играет характеристика, с которой нас познакомили свободные колебания в LC-контуре, — добротность Q. Чем выше добротность, тем острее частотная характеристика последовательной LCR-цепи, которая имеет собственное название — «резонансная кривая». А чем острее резонансная кривая, тем лучше выделяется ток резонансной частоты из всех прочих

переменных токов.

Т-155. **На резонансной частоте сопротивление параллельной LCR-цепи резко возрастает**. В самом упрощённом виде параллельную LCR-цепь можно рассматривать как состоящую из двух параллельно соединённых сопротивлений X_L и X_C (Р-73.2). На низших частотах сопротивление X_L мало, и катушка шунтирует конденсатор. На высших частотах снижается сопротивление X_C, и конденсатор шунтирует катушку. И лишь на резонансной частоте $f_{рез}$ никто никого не шунтирует (Т-8), и общее сопротивление параллельного LCR-контура оказывается весьма большим. При этом, естественно, уменьшается общий ток в цепи контура. И ещё одна интересная деталь: если включить параллельную LCR-цепь в делитель напряжения, то эта часть цепи (LCR) за счёт своего большого сопротивления на резонансной частоте будет выделять напряжение резонансной частоты из всех напряжений, подводимых к делителю.



ВК-178. *В трёхфазном двигателе с вращающимся магнитным полем ток в роторном электромагните поочерёдно наводят токи расположенных по кругу фазовых катушек. Роторная катушка, разумеется, замкнута, иначе в ней не мог бы появиться ток, создающий её магнитное поле. Один из вариантов такого электромагнита — два кольца, соединённых перемычками. Это напоминает беличье колесо, которое зверёк непрерывно вращает, не подозревая, что имитирует работу мощной электрической машины.*

Т-156. **Почему резонансную частоту называют резонансной?** Почему частоту, на которой выполняется условие $X_L = X_C$, мы называем резонансной? Для начала вспомним, что частота, на которой выполняется условие $X_L = X_C$, зависит от самой индуктивности L контура и от его ёмкости C: чуть изменишь один из этих параметров — и условие $X_L = X_C$ уже будет выполняться на другой частоте. А теперь вспомним, что нечто похожее мы наблюдали при возникновении свободных колебаний в LC-контуре. Частота колебаний в этом случае тоже определялась этими параметрами — индуктивностью L контура, его ёмкостью C, при их изменении менялась частота свободных колебаний. Эти два коротких воспоминания привели нас к ответу на поставленный вопрос. Частота $f_{рез}$ названа резонансной в связи с тем, что именно на этой частоте $f_{рез}$ мы наблюдаем не что иное, как резонанс (от латинского «резоно» — «откликаюсь») — совпадение частоты, на которой $X_L = X_C$, с частотой свободных колебаний в контуре. При первом же поступлении энергии от внешнего генератора в контуре начинаются свободные колебания, и генератор поддерживает их, поскольку его частота точно такая же, как и частота этих свободных колебаний. Резонанс — вот что происходит при совпадении частоты генератора с частотой собственных колебаний в контуре, эти частоты равны и подсчитываются по одной и той же формуле.

Рассматривая события в колебательном контуре при резонансе, нужно отметить, что острота его резонансной кривой, так же как и продолжительность собственных колебаний в контуре, определяется его добротностью Q, которая растёт с уменьшением потерь (Р-112). Отсюда важный практический вывод: используя LCR-цепь в качестве фильтра и желая получить острую резонансную кривую, нужно уменьшать собственные потери в контуре, а также сопротивление $R_{внс}$, вносимое в контур за счёт того, что часть энергии из него передаётся в другую электрическую цепь.

Здесь мы автоматически переходим к важнейшему для силовой электротехники процессу — к передаче энергии из одной цепи в другую и к особо популярному устройству, осуществляющему такую передачу, к трансформатору. Рассказ о нём завершит знакомство с набором простейших сложных цепей переменного тока.

Глава 15
Маленькие хитрости большой энергетики

Это характерно для многих, а может быть, даже для всех областей техники, но особо заметно там, где работает электричество. Гигантские машины, многотонные агрегаты, сложнейшие системы начинались с простейших опытов, с маленького приборчика, наконец-то ожившего на столе счастливого изобретателя. Катушка медного провода, возле которой Фарадей быстро перемещал магнит, превратилась в мощный электрогенератор, одна такая машина может накормить электричеством целый город. С небольших моторчиков, послабее, чем у нынешней электробритвы, начинались мощные ходовые двигатели большого авианосца или электровоза. Но такие превращения, конечно же, не происходили сами собой. И вполне объяснимо, что некоторые учебные книги знакомят своих читателей с современными достижениями электрической техники, начиная с известных уже много лет простых схем и процессов. Именно с них начинается путь к пониманию нынешних электрических шедевров.

Т-157. **Трансформатор передаёт энергию из одной электрической цепи в другую без непосредственного контакта между ними.** Используя явление взаимоиндукции (Р-74), можно передавать электрическую энергию из одной цепи в другую без непосредственного контакта между ними, то есть не соединяя их проводниками. Устройство, которое осуществляет такую передачу, это и есть трансформатор, в переводе с латыни — «преобразователь».

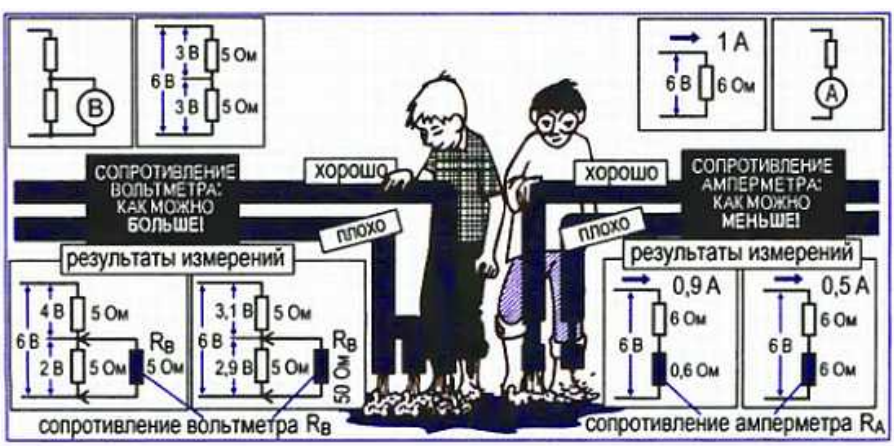
В простейшем случае трансформатор — это две обмотки, связанные общим магнитным потоком Ф (Р-76). В некоторых трансформаторах, главным образом высокочастотных (частота переменного тока сотни килогерц и выше), магнитный поток замыкается по воздуху. В низкочастотных трансформаторах (частота десятки и сотни герц, в том числе промышленная частота 50 герц) магнитный поток проходит через стальной или прессованный ферромагнитный сердечник — стержневой, замкнутый п-образный, ш-образный или кольцевой (Р-47). В

трансформаторах часто бывает несколько обмоток, к одной обмотке (её называют первичной) подводится электрическая энергия от генератора, а с других обмоток (вторичных) энергия передаётся разным потребителям.

Коротко о сердечниках. Сердечники делают из стали, а иногда из пермаллоя, ферромагнитного материала, более дорогого, но со значительно большей магнитной проницаемостью (Р-46). Сердечники, как правило, собраны из пластин или свиты из тонкой ленты (Р-77).

В самом сердечнике, как в любой вторичной обмотке, тоже наводится ток, и, если не принять мер, этот ток окажется весьма большим, сердечник будет отбирать у трансформатора и превращать в тепло немало энергии. Более того, массивный сердечник ведёт себя как короткозамкнутый виток, обмотка с малым сопротивлением, в которой, как мы увидим чуть дальше, возникает большой ток. Из-за этого массивный сердечник будет сильно греться, нагревая весь трансформатор и создавая тем самым угрозу его нормальной работе.

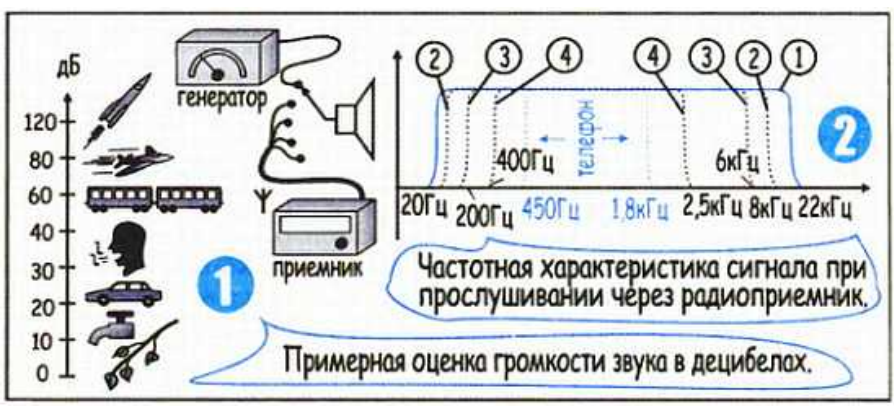
С учётом всего этого сердечник трансформатора собирают из тонких стальных пластин, между которыми находится тонкий слой электрической изоляции, например, лаковое покрытие. Поэтому пластины электрически изолированы одна от другой, и в каждой наводится свой собственный ток. При этом токи в соседних пластинах сердечника создают магнитные поля, которые действуют друг против друга, в итоге общая мощность, пожираемая сердечником (Т-8), резко уменьшается, и предотвращается его нагрев.



ВК-179. *Основные электроизмерительные приборы амперметр и вольтметр в чем-то похожи и устроены вроде бы одинаково. Но различие между ними всё же есть, причём исключительно важное*

различие. Амперметр включается последовательно в цепь, где нужно провести измерение тока. Поэтому сопротивление амперметра должно быть очень небольшим, во много раз меньше, чем сопротивление цепи, куда включается прибор. В противном случае амперметр заметно увеличит сопротивление цепи, где измеряется ток, и покажет значительно меньшую величину тока, чем была без него.

Вольтметр подключается параллельно участку, на котором измеряется напряжение. Поэтому сопротивление вольтметра должно быть большим, оно должно быть значительно больше, чем само сопротивление участка, к которому подключается прибор. В противном случае вольтметр зашунтирует этот участок, заметно уменьшит его сопротивление и покажет меньшее напряжение, чем было до подключения прибора. Вывод прост: сопротивление амперметра должно быть как можно меньше, а вольтметра как можно больше.



Р-71. ИСКАЖЕНИЯ НЕЗАМЕТНЫЕ И НЕДОПУСТИМЫЕ. Слух человека — творение природы. Было затрачено много миллионов лет, чтобы сформировать его, и сегодня мы при рождении получаем это чудо в готовом виде с чрезвычайно высокими характеристиками. Достаточно вспомнить, что наш слух улавливает слабые звуки от упавшего с дерева листа и в то же время слышит вблизи (хотя и на грани боли) в миллиарды раз более мощный шум двигателей реактивного самолёта (1). Мы слышим диапазон частот от 16 герц до 22–23 килогерц (2) и где-то в районе 1 килогерца можем уловить изменение частоты на 0,3 процента. Можно только восхищаться, читая в книгах по физиологии про то, что уже известно о молекулярных

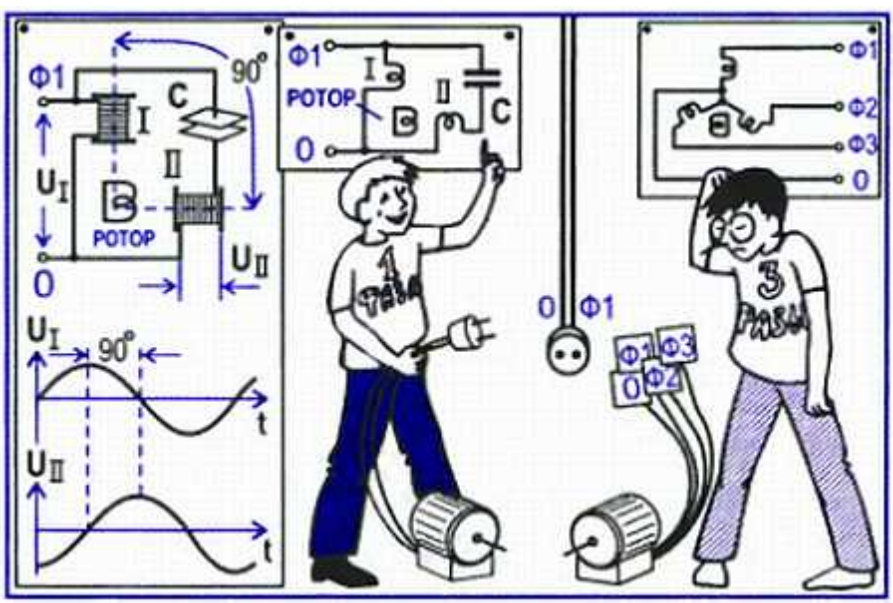
машинах нашего слуха, и про то, что пока еще неизвестно. Но вот примерно 130 лет назад воспроизведение звука поручили электричеству — появился телефон, а в 1920 году в городе Питтсбурге (США) заработала первая радиовещательная радиостанция, рассчитанная на владельцев радиоприёмников. Звуковоспроизводящая техника достигла высокого совершенства, но и сегодня в электронных аппаратах, особенно в малогабаритных и недорогих, часто мирятся с заметными искажениями звука. Главным образом с сужением полосы воспроизводимых частот (3), что в какой-то мере еще терпимо при воспроизведении речи, но сильно искажает музыку. Нередко сжат динамический диапазон — соотношение между самым тихим и самым громким звуком — и допускаются значительные (до нескольких процентов) нелинейные искажения, которые приводят к появлению новых составляющих в спектре звука, создают ощущение его засорённости и хрипоты. В то же время создаются системы, такие, например, как CD и DVD, обеспечивающие очень высокое качество звучания.

Потери в сердечнике увеличиваются с частотой, для высокочастотных трансформаторов уже недостаточно собирать сердечники из пластин, их делают из магнитодиэлектриков. Это спрессованный мелкий ферромагнитный порошок, каждая крупинка которого отделена от других тончайшим слоем изолирующего лака, отсюда и вторая часть названия этого материала — «диэлектрик». Основное его достоинство в принципе такое же, как у пластинчатого сердечника: в крупинках магнитодиэлектрика наводятся токи, которые создают магнитные поля противоположного направления.

Если подвести к первичной обмотке трансформатора переменное напряжение U_1, то в этой обмотке пойдёт переменный ток I_1 (Р-76). Он создаст переменный магнитный поток, под действием которого наведётся напряжение U_2 во вторичной обмотке (иногда, сразу же предположив, что во вторичную цепь уже включена нагрузка $R_н$, напряжение на вторичной обмотке трансформатора обозначают $U_н$). Точнее было бы говорить о наведённой э.д.с., но вместо неё мы сразу же введём напряжение U_2, не забывая, что какая-то часть э.д.с. теряется на сопротивлении самой вторичной обмотки. Если к вторичной обмотке подключить нагрузку $R_н$, то в ней пойдёт ток I_2. Если U_1

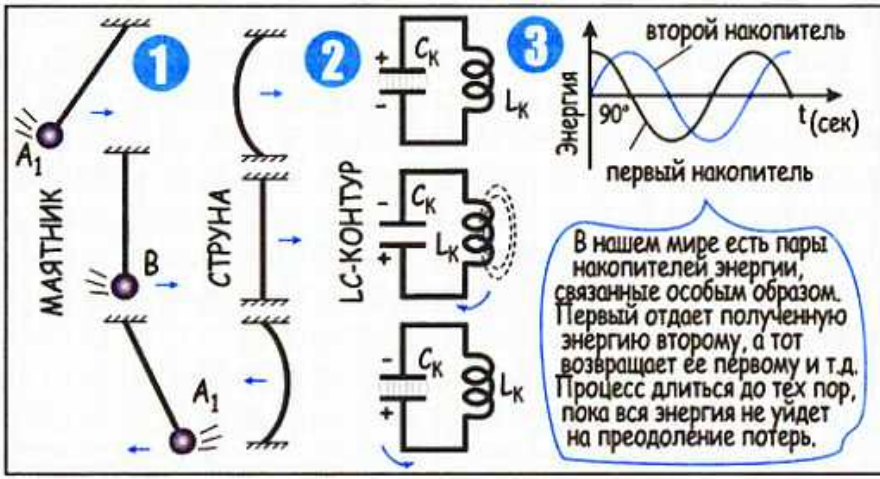
синусоидальное напряжение и трансформатор не искажает форму тока, то и напряжение U_2 тоже будет синусоидальным — наведённое напряжение зависит от скорости изменения тока, а скорость изменения синусоиды — тоже синусоида, сдвинутая по фазе на 90° (Р-60).

Т-158. **Трансформатор увеличивает либо напряжение, либо ток, ни в коем случае, однако, не увеличивая мощность**. Величина наведённого напряжения U_2 зависит от нескольких факторов. Например, от того, насколько магнитный поток первичной обмотки пронизывает вторичную: чем большая часть этого потока рассеивается, тем, при прочих равных условиях, наведённое напряжение будет меньше. Именно поэтому обмотки трансформатора чаще всего размещают на замкнутом ферромагнитном сердечнике, по сердечнику замыкается практически весь магнитный поток, и всё магнитное поле первичной обмотки пронизывает витки вторичной. В трансформаторе с такой стопроцентной магнитной связью напряжение на вторичной обмотке определяется коэффициентом трансформации — отношением числа витков w_2 во вторичной обмотке к числу витков w_1 в первичной обмотке (Р-76). Это соотношение называется коэффициентом трансформации n и, как было сказано, $\mathbf{n = w_2/w_1}$.



ВК-180. *Получая в своей квартире одно фазовое напряжение (**Ф**$_1$) и общий провод (0), можно всё же создать вращающееся магнитное поле и использовать рассчитанный на него асинхронный*

двигатель. Ток создаст в катушке I фазовое напряжение I. И, пройдя через конденсатор, ток создаст в катушке $\mathbf{I}_I$ напряжение, которое отстаёт от первого на 90°. Два магнитных поля, сдвинутых по фазе, вращают центральный электромагнит, а вместе с ним и ротор асинхронного двигателя.



Р-72. СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ — ОТ ЛИРИКИ К ФИЗИКЕ. Если посмотреть внимательно, то непременно заметишь, что в нашем мире встречается бесконечное многообразие движений и изменений. И есть в этом многообразии группа движений очень похожих — это то, что мы называем словами «свободные колебания». Они возникают там, где есть многими не замеченное и пока ещё достойно не воспетое чудо природы — пара накопителей энергии, определённым образом связанных друг с другом. На этом рисунке представлены три такие пары: маятник (1), струна (2) и LC-контур (3).

Отклоним маятник влево и отпустим его (1). Под действием силы тяжести (притяжение к Земле) маятник двинется вправо. Проходя центральную точку, он уже растратил потенциальную энергию, которая была у него перед стартом, но набрал скорость, и потенциальная энергия полностью перешла в кинетическую, в энергию движения. За счёт неё маятник проскакивает центральную точку и в итоге приходит в крайнее правое положение, откуда, опять-таки под действием силы тяжести, начнётся его движение в обратную сторону. В итоге, обменивая потенциальную энергию на кинетическую, а затем кинетическую на потенциальную,

маятник вернётся в крайнюю левую точку, и всё начнётся с начала — маятник будет двигаться туда-обратно, то есть будет совершать свободные колебания.

Примерно то же самое мы увидим, если оттянем центр натянутой струны и отпустим её (2). Здесь колебания будут происходить за счёт обмена энергии упругой деформации струны (временные изменения молекулярной структуры при натяжении струны) и всё той же кинетической энергии — энергии движения. И, наконец, электромагнитные колебания в контуре $\mathbf{L}_{\text{кск}}$ (3). Для начала передадим ему небольшую порцию энергии, например, зарядив конденсатор $\mathbf{C}_{\text{к}}$ от внешней батареи. Он начнёт разряжаться через катушку $\mathbf{L}_{\text{к}}$, в цепи пойдёт ток, и вся энергия из электрического поля конденсатора $\mathbf{C}_{\text{к}}$ перейдёт в магнитное поле катушки $\mathbf{L}_{\text{к}}$. Затем ток перезарядит конденсатор, «+» и «—» поменяются местами, и ток, естественно, пойдёт в другую сторону. Этот обмен энергий между $\mathbf{C}_{\text{к}}$ и $\mathbf{L}_{\text{к}}$ будет продолжаться, поддерживая свободные колебания (в частности, ток туда-обратно) в контуре. Они через какое-то время прекратятся из-за различных потерь энергии, чем меньше эти потери, тем дольше будут длиться колебания.

Если во вторичной обмотке больше витков, чем в первичной обмотке, то коэффициент трансформации и больше единицы, трансформатор в n раз повышает напряжение и называется повышающим. А если w_2 меньше, чем w_1, то n меньше единицы, и трансформатор понижающий.

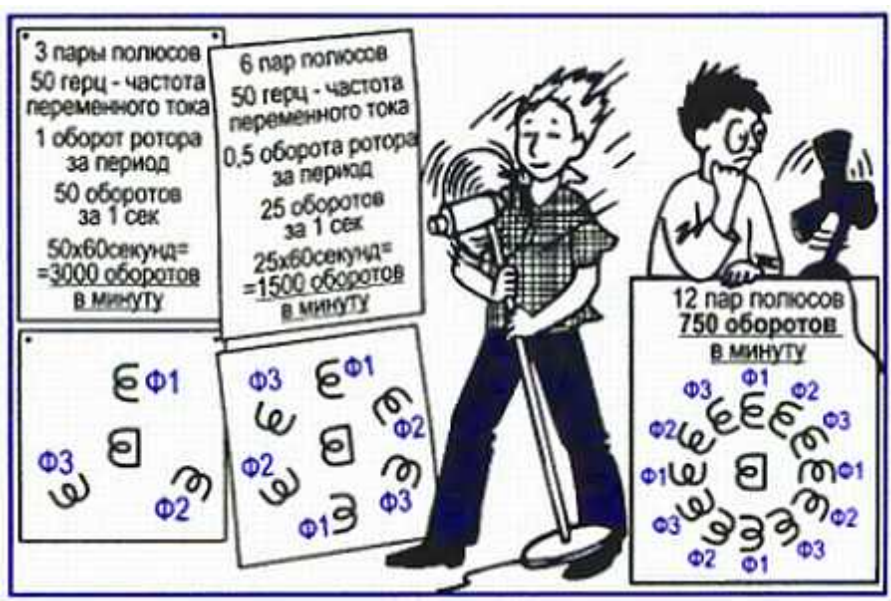
В понижающем трансформаторе число витков w_2 составляет лишь часть от w_1, например, 0,5 или 0,1. Эта величина как раз и есть коэффициент трансформации и понижающего трансформатора, и напряжение U_2 составляет такую же часть от U_1. Например, если к первичной обмотке подводится напряжение U_1 = 150 В, а коэффициент трансформации n = 0,1, то на вторичной обмотке будет напряжение $\mathbf{U}_2 = \text{n}\cdot\mathbf{U}_1 = 0{,}1\cdot 150$ В = 15 В. На практике, особенно при расчётах «в уме», вместо, так сказать, официального коэффициента трансформации, который у понижающего трансформатора меньше единицы, пользуются обратной величиной — отношением большего числа витков к меньшему, то есть у понижающего трансформатора w_1 к w_2. Если, скажем, в первичной обмотке 1000 витков (w_1), а во вторичной 100 (w_2), то официальный коэффициент трансформации составит

0,1, а отношение w_1 к w_2 составит 10. Воспользуемся предыдущим примером: к первичной обмотке подводится 150 В, и поскольку трансформатор понижающий, напряжение на вторичной обмотке будет в 10 раз меньше, чем на первичной, то есть 15 В.

Всё это очень простая, можно сказать, примитивная арифметика, любой трансформатор может быть и понижающим, и повышающим, может увеличивать либо уменьшать напряжение в n раз — всё зависит от того, к какой обмотке подводишь напряжение и с какой снимаешь.

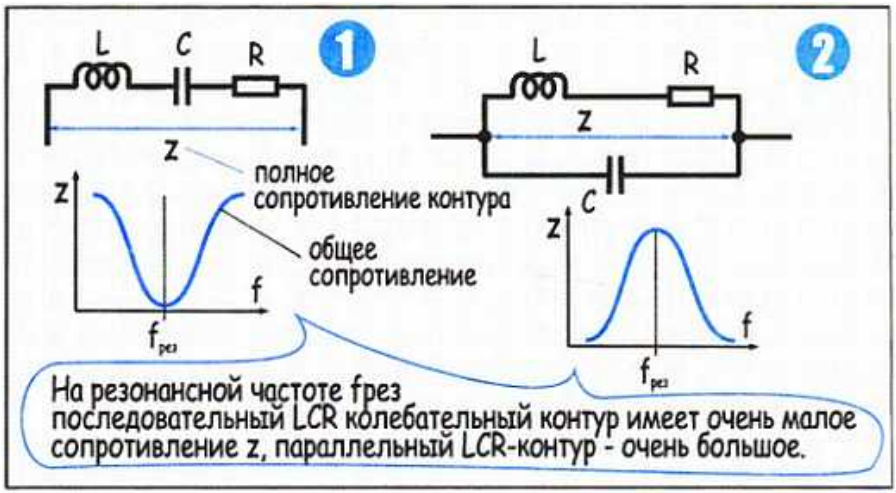
Но есть, однако, одно чрезвычайно серьёзное ограничение: к какой-либо обмотке трансформатора нельзя подводить напряжение, которое превышает допустимую для этой обмотки расчётную величину. Например, к обмотке, которая рассчитана на 120 В, нельзя подвести 220 или даже 160 В. Нарушение этого правила нередко завершается дымом — трансформатор быстро перегревается и выходит из строя.

Теперь о токах. Когда во вторичную обмотку включена нагрузка, то в этой обмотке идёт ток I_2. Конечно же, вторичная обмотка сама никакой мощности не даёт, а получает её из первичной обмотки, то есть в конечном итоге от генератора. И в идеальном случае мощность P_2, потребляемая во вторичной цепи, равна мощности P_1, поступающей от генератора в первичную цепь.



ВК-181. *Если в асинхронном двигателе вместо трёх пар*

магнитных полюсов установить 6 пар полюсов, то ротор двигателя за время одного периода пройдёт не всю окружность, а только половину. Ему достаточно этого расстояния, чтобы встретиться с тремя электромагнитами, поочерёдно получающими все три фазовых напряжения одного периода. Минуя довольно простые промежуточные рассуждения, можно сделать вывод: увеличив в 2 раза число пар полюсов, мы в 2 раза снижаем обороты двигателя.



P-73. ДВА, КАЗАЛОСЬ БЫ, ОДИНАКОВЫХ LCR-КОНТУРА ИМЕЮТ РАЗНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ. Недавно мы сравнительно подробно рассмотрели поведение последовательного LCR-контура (P-66) при изменении частоты **f** питающего его напряжения (1). Мы обратили внимание на то, что напряжения $\mathbf{U}_L$ на катушке и $\mathbf{U}_c$ на конденсаторе сдвинуты по фазе на 180°, то есть действуют одно против другого. Можно считать, что это действуют друг против друга сопротивления $\mathbf{X}_L$ и $\mathbf{X}_c$, поэтому общее сопротивление всей последовательной цепи равно их разности. Как мы уже давно знаем, с увеличением частоты индуктивное сопротивление $\mathbf{X}_L$ растёт, а ёмкостное $\mathbf{X}_c$ уменьшается. На некоторой частоте $\mathbf{f}_{рез}$ оба эти сопротивления оказываются одинаковыми и общее реактивное сопротивление контура равно нулю. В контуре остаётся небольшое активное сопротивление **R**, и поэтому сильно растёт ток, а вместе с ним напряжение на конденсаторе и катушке.

Теперь посмотрим, что произойдёт, если тот же

контур, ту же катушку L с сопротивлением проводов **R** и тот же конденсатор **C** подключить к источнику сигнала в виде двух параллельных цепей (2). В таком параллельном контуре ток разветвится и в каждой из двух ветвей его величина будет определяться её сопротивлением — $\mathbf{X}_L$ и $\mathbf{X}_C$. На низких частотах общий ток параллельного контура будет большим, а общее сопротивление контура маленьким — катушка шунтирует конденсатор. И на высоких частотах общий ток будет большим и сопротивление маленьким — конденсатор шунтирует катушку. Лишь на резонансной частоте $\mathbf{f}_{рез}$, где $\mathbf{X}_L = \mathbf{X}_C$, никто никого не шунтирует и общее сопротивление параллельного контура оказывается большим. Поведение последовательного и параллельного контуров тщательно исследовано теорией, но хочется верить, что наши упрощённые пояснения не помешают дальнейшему серьёзному изучения темы.

И ещё одно примечание. Главные события в последовательном и в параллельном контурах происходят на частоте $\mathbf{f}_0$, на которой в контуре возникают свободные колебания. Получается, что контур, подключённый к генератору переменного тока, как бы резонирует на частоте своих свободных колебаний. Именно поэтому такую частоту называют резонансной $\mathbf{f}_{рез}$.

Оговорка «в идеальном случае» понадобилась потому, что реально какая-то мощность теряется в самом трансформаторе, и нагрузке достаётся несколько меньше, чем даёт генератор. Пренебрегая этими обычно небольшими потерями (несколько процентов и меньше), из условия $P_1 = P_2$ можно найти соотношение токов I_1 и I_2 в первичной и вторичной обмотках.

Соотношение между токами I_1 и I_2 также определяется коэффициентом трансформации n, но только на этот раз коэффициент n действует «в обратную сторону»: во сколько раз трансформатор понижает напряжение на вторичной обмотке, во столько же раз повышается ток в её цепи. А если напряжение U_2 во вторичной обмотке больше, чем U_1, то во столько же раз ток I_2 меньше, чем I_1 — только при этом условии мощности P_1 и P_2в обеих обмотках могут быть одинаковыми.

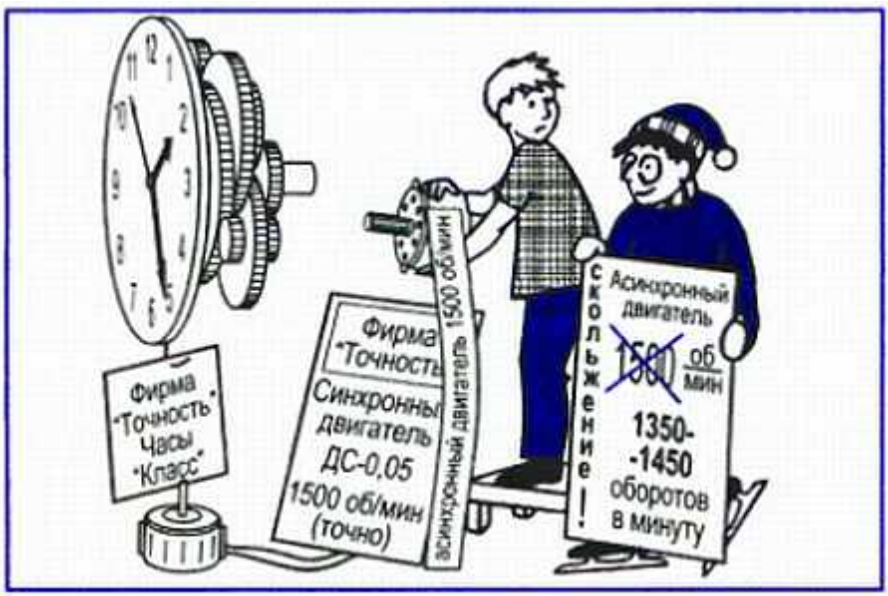
Для иллюстрации — простой пример. Напряжение $U_1 = 220$ В подводится к первичной обмотке понижающего

трансформатора, и на его вторичной обмотке действует напряжение U_2 = 11 В, то есть трансформатор понижает напряжение в 20 раз. Ко вторичной обмотке подключена такая нагрузка, что в её цепи идёт ток 40 А. Без каких-либо измерений можно подсчитать, что в цепи первичной обмотки идёт ток 2 А, он в те же 20 раз меньше, чем ток в нагрузке. И при этом генератор передаёт в первичную обмотку именно такую мощность ($\mathbf{P}_1 = \mathbf{U}_1 \cdot \mathbf{I}_1$ = 220 В · 2 А = 440 Вт), какую потребляет нагрузка во вторичной цепи ($\mathbf{P}_2 = \mathbf{U}_2 \cdot \mathbf{I}_2$ = 11 В · 40 А = 440 Вт).

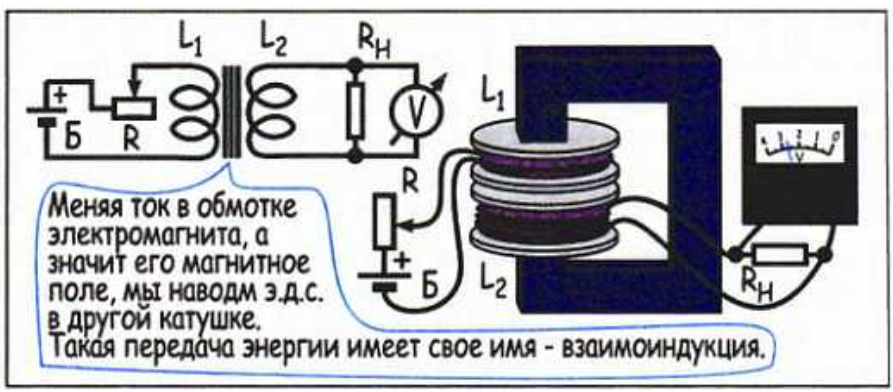
Это не случайный результат, не типичный, а единственно возможный. Мощность, потребляемая во вторичной цепи, не может быть больше, чем поступает в первичную цепь от генератора, поскольку трансформатор — это всего лишь трансформатор, преобразователь, а не вечный двигатель. Ну а меньше мощность во вторичной цепи тоже быть не может — мы договорились, что рассматриваем работу трансформатора без учёта потерь.

Т-159. **Сопротивление нагрузки в цепи вторичной обмотки трансформатора определяет режим его первичной цепи — создаёт в ней вносимое сопротивление.** Итак, при определённом напряжении U_1, поступающем от генератора (например, из сети), напряжение U_2 во вторичной обмотке определяется самим устройством трансформатора — его коэффициентом трансформации. А вот что касается токов I_1 и I_2, то они зависят ещё и от сопротивления нагрузки R_2 (мы обычно обозначали её $R_н$), которая подключена ко вторичной обмотке. Чем больше нагрузка, то есть чем меньше сопротивление R_2, тем при неизменном напряжении U_2 больше ток I_2 — закон Ома!

Ну а раз при неизменном напряжении растёт ток, то увеличивается и потребляемая нагрузкой мощность P_2. При этом, соответственно, должна быть больше получаемая от генератора мощность P_1 и вместе с ней ток I_1.Иными словами, сопротивление нагрузки во вторичной цепи трансформатора влияет на режим его первичной цепи, как бы вносит в первичную цепь некоторое сопротивление $R_{вн}$, которое и определяет ток в этой первичной цепи. Зависит вносимое сопротивление $R_{вн}$ также и от коэффициента трансформации и, причём зависит очень сильно, в квадрате. Отсюда следует, что очень опасно неумеренно увеличивать нагрузку, то есть уменьшать $R_н$, это может привести к недопустимо большим токам в обмотках, к перегреву трансформатора и непоправимому разрушению тонкого изолирующего слоя на проводах.



Р-182. *Число оборотов асинхронного двигателя всегда меньше, чем следует из приближённых расчётов. Происходит это потому, что само существование двигателя, само движение его ротора связаны с появлением у этого ротора собственного магнитного поля, которое следует за вращающимся полем статора. А ток, создающий поле ротора, наводится в нём внешними магнитами, если поле ротора несколько смещается относительно их поля, например, если сам ротор движется чуть медленнее внешнего поля.*



Р-74. ВЗАИМОИНДУКЦИЯ — ИЗМЕНЕНИЕ ТОКА В ОДНОЙ КАТУШКЕ НАВОДИТ Э.Д.С. В СОСЕДНЕЙ. Этот процесс с короткими комментариями уже появлялся на наших рисунках (Р-54 и другие), но будущие темы

требуют, чтобы напомнить о нём ещё раз. Представьте себе две катушки, расположенные рядом на общем ферромагнитном сердечнике. Если по одной катушке $\mathbf{L_1}$ пропустить постоянный ток от батареи **Б**, то он создаст в сердечнике постоянное магнитное поле, которое охватит также витки катушки $\mathbf{L_2}$. Но никакой э.д.с. при этом в катушке $\mathbf{L_2}$ не наведётся — э. д.с. электромагнитной индукции появляется в катушке только в том случае, когда меняется магнитное поле, в котором она находится. В этом можно убедиться, перемещая движок переменного сопротивления **R**. При этом перемещении будет меняться ток в цепи катушки $\mathbf{L_1}$, а значит, и магнитное поле, созданное этим током. В моменты изменений магнитного поля (только в моменты изменений!) будет появляться э.д.с. в катушке $\mathbf{L_2}$.

Теперь, забегая вперед, подведём к катушке $\mathbf{L_1}$ не постоянное, а переменное напряжение. При этом будет непрерывно меняться ток в ней, а значит, и магнитное поле, в котором находятся обе катушки. И в катушке $\mathbf{L_2}$, следовательно, будет наводиться переменная э.д.с. Но об этом чуть позже.

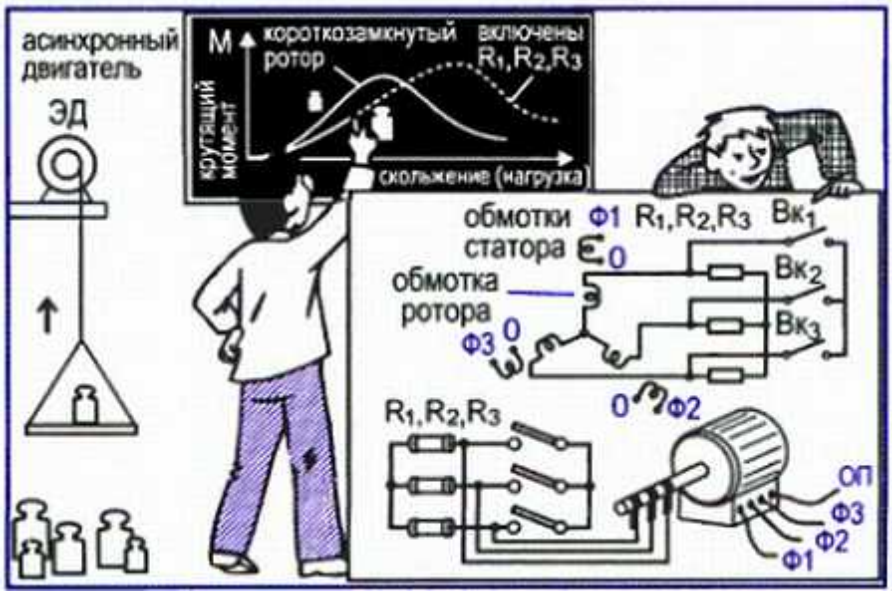
Теперь нетрудно понять, почему к трагическим последствиям приводит короткое замыкание соседних витков в любой из обмоток трансформатора. Короткозамкнутые витки — это фактически отдельная вторичная обмотка с недопустимо малым сопротивлением нагрузки, то есть с недопустимо большой нагрузкой на трансформатор. Если не сработает предохранитель, то эта недопустимая нагрузка сразу же и навсегда выведет трансформатор из строя. Забегая вперед, заметим, что предохранитель, как правило, включён в цепь первичной обмотки трансформатора. Когда резко возрастает ток I_2, то столь же резко возрастает I_1, предохранитель срабатывает и отключает первичную обмотку от генератора.

Т-160. **Температурный режим работающего трансформатора: «холодный» — «теплый — «горячий» — «пошёл дым».** Кто-то из первых исследователей электрического тока (его имя, к сожалению, не удалось найти в летописи электричества) наверняка обрадовался, случайно обнаружив, что проводник, по которому идёт ток, слегка нагревается. Об истинных причинах этого нагревания в те времена ничего не было известно, но само открытие вселяло надежду — только что научились создавать в проволоке электрический ток, а он уже

демонстрирует свою способность делать полезное дело, вырабатывать тепло.

При упоминании об этом факте читатель, возможно, усмехнулся: подумаешь, великое открытие, удивительный эффект, породивший электрический утюг. Просто какая-то мелочь, какая-то маленькая хитрость в сравнении с электрическим освещением всей планеты, электропоездами, телефоном и телевидением. Однако же из этой мелочи, из нагревания медного проводника электрическим током, развились в итоге два больших направления практической электротехники. Одно из них — создание электронагревательных приборов, в число которых, кстати, входят не только электроутюги и электрочайники, но также сталеплавильные печи, сварочные аппараты и мощные отопительные системы космических кораблей.

Второе направление можно назвать службой тепловой безопасности, его главная продукция — понимание физических процессов, технические расчёты, разработка норм и правил, не позволяющих тепловому действию тока приносить вред электрическим цепям и машинам или тем более выводить их из строя. А о том, что такое может случиться, многие знают по собственному опыту, по диагнозу, который приходилось слышать от мастера: «Ваш электромотор (трансформатор, электрочайник, пылесос и тому подобное) перегрелся и сгорел». Вместе с тем ничего такого не должно происходить, электрические системы, приборы и аппараты десятилетиями служат безотказно, если всё в них правильно рассчитано, изготовлено и если они не выходят за пределы расчётного режима.



ВК-183. *Есть возможность несколько менять режим асинхронного двигателя, если с помощью скользящих контактов включать в его ротор дополнительные резисторы с небольшим сопротивлением. Эти резисторы включаются, например, в момент пуска двигателя, если этот пуск затруднён большой нагрузкой. Когда двигатель набирает обороты, можно выключить резисторы в роторной цепи и превратить машину в экономичный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.*

ПротивоЭДС
В
R
Б
L=5Гн
Когда в катушке меняется ток, а вместе с ним её магнитное поле, оно наводит э.д.с. в самой катушке и это называют самоиндукция. О способности катушки создавать магнитное поле говорит её индуктивность, она обозначается буквой L.
Единица индуктивности L - генри (Гн), катушка имеет такую индуктивность, если при изменении в ней тока на 1 ампер за 1 секунду в самой катушке наводится э.д.с. самоиндукции 1 вольт.

Р-75. САМОИНДУКЦИЯ — ИЗМЕНЕНИЕ ТОКА В КАТУШКЕ НАВОДИТ Э.Д.С. В НЕЙ ЖЕ. Как мы уже знаем, когда по катушке идёт меняющийся ток, то она создаёт меняющееся магнитное поле и наводит

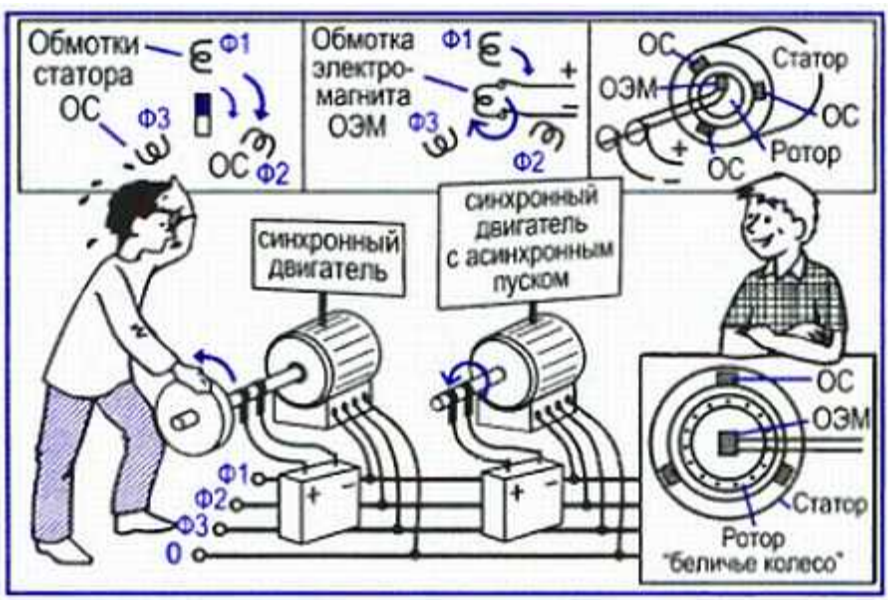
электродвижущую силу. Если есть соседние катушки, то э.д.с. наводится в них, но во всех случаях катушка непременно наводит электродвижущую силу сама в себе, и называется она «э.д.с. самоиндукции». Величина этой электродвижущей силы зависит от скорости изменения тока — чем быстрее меняется ток, тем больше наведённая им э.д.с., в том числе и э.д.с. самоиндукции. Кроме того, её величина зависит и от самой катушки, от её способности создавать и воспринимать магнитное поле. Об этих качествах катушки говорит особая её характеристика — индуктивность, обозначаемая буквой **L**, как и сами катушки на схемах и в формулах. Единица измерения индуктивности — генри (сокращенно Гн), эта единица названа именем выдающегося американского физика Джозефа Генри. Если в катушке при изменении тока на 1 ампер за 1 секунду наводится э.д.с. самоиндукции 1 вольт, то индуктивность такой катушки 1 генри. Индуктивность катушки можно приближённо оценить и по её внешнему виду — по примерному числу витков, наличию сердечника и иным явным приметам.

Электрический ток, проходя по проводнику, оставляет в нём часть своей энергии, выделяет в проводнике определённую мощность. Мощность, которая достаётся проводнику, зависит от его сопротивления и очень сильно — в квадрате! — зависит от тока. Увеличьте ток в проводнике в три раза, и выделенная в нём мощность возрастёт в девять раз. Вся эта мощность выделяется в виде тепла, и дальше всё зависит от того, насколько хорошо проводник отдаёт тепло в окружающее пространство. Если это проводник большого диаметра, то есть с большой поверхностью теплоотдачи, то он не будет сильно нагреваться, и тепловой баланс («сколько получаю мощности, столько отдаю в виде тепла окружающему пространству», Т-8) установится при сравнительно низкой температуре. Если же проводник тонкий, если излучающая тепло поверхность у него маленькая, то баланс «получаю-отдаю» автоматически установится при более высокой температуре. Но всегда теплообмен должен быть рассчитан так, чтобы эта более высокая температура не доводила до вполне возможных неприятностей, например, до разрушения изолирующего лакового покрытия обмоточного провода, что легко может привести к короткому замыканию соседних витков и в итоге к возгоранию.

Кстати, тип изоляции также влияет на теплообмен. Лучше

всего отдаёт тепло голый провод, без изоляции. Незначительно ухудшает теплообмен тонкий, в сотые доли миллиметра, слой эмалевой изоляции очень распространённого провода типа ПЭ (провод эмалированный). Значительно хуже отдаёт тепло провод с полимерной или иной плотной изоляцией. Важно также, в каких условиях находится проводник. В открытой проводке или в воздушной линии электропередачи он охлаждается лучше, чем в подземном кабеле или в многослойной обмотке трансформатора и электродвигателя.

В одном случае, правда, перегрев проводника используется с пользой для дела — в плавких предохранителях. Их основа — короткий кусочек провода строго рассчитанного и проверенного сечения, этот проводок включается в электрическую цепь последовательно, и через него проходит общий ток. Диаметр проводка выбран с таким расчётом, что, если ток заметно превысит нормальную величину, проводок перегреется, сгорит и разорвёт цепь, спасая весь аппарат от неприятностей.



ВК-184. *На производстве часто желательно использование синхронных двигателей — их ротор вращается с постоянной скоростью. Но для этого нужно ввести двигатель в синхронизм — раскрутить ротор до той скорости, с которой он будет вращаться. Для мощных двигателей это серьёзная проблема, и одно из её решений — синхронный двигатель с асинхронным пуском. Он начинает вращаться как асинхронный и, когда ротор набирает нужные обороты, автоматически переключается в свой основной*

режим.

U1 1 2 U2
W1 W2
число витков в обмотках
k - коэффициент трансформации: k = W2/W1
U2=U1·k
повышающий трансформатор: W2>W1 k>1 U2>U1
понижающий трансформатор: W2<W1 k<1 U2<U1
W1
W2
1
Трансформатор: две обмотки (иногда и более) на ферромагнитном сердечнике. Самая, пожалуй, простая электрическая машина. Важная ее характеристика - коэффициент трансформации - соотношение числа витков обмоток w2 и w1 т.е. способность повышать или понижать напряжение (ток).
2 пример
U1=200в 1 2 U2=10в
W1=1000 вит. W2=50 вит.
k=0,05 U2=U1·k = 200·0,05 = 10в

Р-76. ГЛАВНЫЕ ЦИФРЫ ТРАНСФОРМАТОРА. Настала очередь самой неприметной, самой тихой электрической машины, выполняющей чрезвычайно важную работу и, скорее всего, самой распространённой. Настало время трансформатора. Это две (иногда больше) достаточно близко расположенные катушки, из одной из них в другую (в другие) передаётся электрическая мощность за счёт взаимоиндукции. Одна из особо важных цифр, поясняющих возможности трансформатора, это его коэффициент трансформации **к**, который иногда обозначают буквой **n** (1). Коэффициент трансформации — это отношение числа витков вторичной обмотки к числу витков первичной обмотки, куда поступает преобразуемое напряжение. Если во вторичной обмотке больше витков, чем в первичной, то есть если коэффициент трансформации больше единицы, то трансформатор повышает напряжение, если меньше единицы — понижает. Другие важные цифры — напряжения и токи, на которые рассчитаны те или иные обмотки. Эти данные нередко приводят на самом корпусе трансформатора или на пластмассовой пластине, прикреплённой к нему. Превышать эти цифры очень не рекомендуется, так как это повышает вероятность непоправимых повреждений. И, наконец, ещё одна важная цифра — мощность трансформатора,

которую примерно можно оценить по его внешнему виду. В домашней технике используют очень небольшие трансформаторы мощностью несколько ватт (зарядные устройства для сотовых телефонов) и средние мощностью 50-500 ватт (приёмники, телевизоры, мощные усилители звука). А на электростанциях на ограждённой площадке можно увидеть группы больших трансформаторов высотой несколько метров и рассчитанных на преобразование мощности в тысячи киловатт.

Т-161. **Удивительные профессии простого проводника — сверхпроводимость и скин-эффект**. Электрическое сопротивление любого физического тела, в том числе сопротивление проволоки, зависит от температуры — в подавляющем большинстве случаев оно возрастает при нагревании. Так, при повышении температуры от 20 до 500 °С сопротивление медных и алюминиевых проводов возрастёт примерно на 20 %, а стальных почти на 30 %, это весьма заметные изменения. Вместе с тем сильное охлаждение некоторых проводников понижает их сопротивление и некоторые даже вводит в состояние сверхпроводимости, когда у проводника полностью исчезает активное электрическое сопротивление.

Историю открытия сверхпроводимости часто начинают с 1877 года, когда охладили газообразный кислород до недостижимой никогда ранее температуры -182,9 °С (минус 182,9 градуса по шкале Цельсия) и превратили его в жидкость. Создание техники для получения очень низких температур дело непростое и небыстрое. Но всё же через 30 лет голландский физик Хейке Камерлинг-Оннес, создав лучшую в мире лабораторию сверхнизких температур, сумел получить жидкий гелий при температуре около -269 °С, или, иначе, примерно 4 градуса по шкале Кельвина, сокращённая запись 4 К. И тут обнаружилось, что при этой температуре ртуть вообще перестаёт оказывать сопротивление электрическому току — при этой температуре ртуть скачкообразно переходит в состояние, которому дали имя сверхпроводимость.

Спустя много лет теоретики на основе квантовой механики объяснили явление сверхпроводимости, оно связано с очень тонкими и сложными физическими эффектами, в их числе спаривание свободных электронов и полное вытеснение магнитного поля из сверхпроводника.

Если бы сверхпроводимость удалось получить при обычной,

как принято говорить, при комнатной температуре, то это, конечно, совершило бы переворот в электротехнике — исчезли бы потери энергии и вместе с ними исчезла бы проблема перегрева электрических машин, по тонкому, как нитка, проводу можно было бы пересылать огромные токи и тысячи киловатт электрической мощности, ничего при этом не теряя. Несколько раз появлялись сообщения об открытии высокотемпературной сверхпроводимости, и в 1987 году Нобелевской премией было отмечено создание токопроводящих керамических материалов, которые становятся сверхпроводниками при температуре жидкого азота, то есть примерно при -77 ˚С. Но пока многие высокотемпературные сверхпроводники теряют свои ценные свойства при сравнительно сильных токах, пока практике переданы сплавы на основе ниобия, у которых устойчивая сверхпроводимость наступает при температуре около 23 К = -250 ˚С. Сейчас, чтобы получить столь низкую температуру, сверхпроводник сначала помещают в жидкий азот, получать который и поддерживать в жидком состоянии не так дорого, как гелий. Сверхпроводник, охлаждённый в жидком азоте, значительно проще и дешевле доводят до нужной температуры (-250 ˚С) в жидком гелии (Р-81).

ВК-185. *Мы смогли познакомиться с особенностями некоторых электрических двигателей, но их разновидностей существует очень много. Достаточно вспомнить две основные группы — двигатели постоянного и переменного тока, в первой*

группе моторы с разным соединением обмоток якоря и электромагнита, а во второй — с синхронным и асинхронным вращением ротора. Вместе с тем 80 % всех выпускаемых двигателей приходится на простые и надёжные асинхронные машины с короткозамкнутым ротором.

Р-77. СЕРЬЁЗНУЮ ОПАСНОСТЬ УСТРАНИЛИ. НЕПРОСТО, НО УСТРАНИЛИ. Одно из особо опасных повреждений в трансформаторе, это появление в какой-либо обмотке короткозамкнутых витков, например из-за повреждения эмалевой изоляции провода. Такой виток становится как бы отдельной обмоткой с очень малым сопротивлением и, следовательно, с большим током, который быстро нагревает трансформатор и выводит его из строя. Уже в первые годы становления большой электротехники таким короткозамкнутым витком оказывался стальной сердечник трансформатора, в нём тоже наводился большой ток со всеми вытекающими из этого опасными последствиями. Но вскоре был придуман способ избавления от этого короткозамкнутого витка без потери достоинств ферромагнитного сердечника. Его собирали из довольно тонких стальных пластин, между которыми находилась тончайшая изоляция. Ток наводился в каждой пластине отдельно, и в соседних пластинах он шёл в разные стороны (3). При этом общий ток в сердечнике резко уменьшался и опасности перегрева больше не было. Сейчас по этой технологии собирают пластинчатые сердечники всех

трансформаторов и электрических машин.

Кстати, первая демонстрация сверхпроводимости состояла в том, что в особый сосуд с жидким гелием поместили получивший порцию энергии L_c-контур, и колебания в нём продолжались чуть ли не несколько месяцев — благодаря сверхпроводимости прекратились потери энергии в контуре, его добротность стала чрезвычайно высокой (Р-112).

Сплошной стольной сердечник — короткозамкнутый виток и в нем _ большие потери энергии. В пластинах сердечника токи противодействуют друг другу и потери резко снижаются

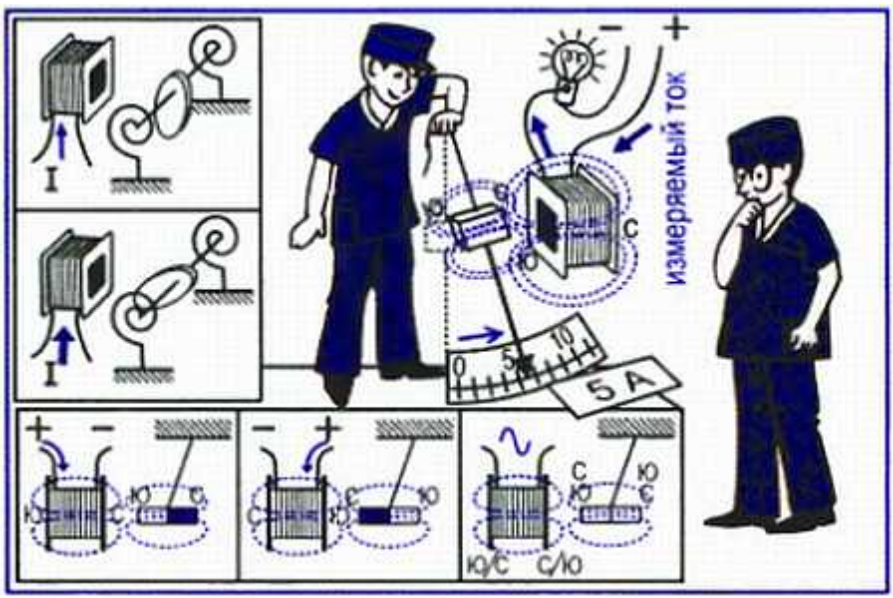
Из-за необходимости гелиевых температур сверхпроводимость пока остаётся мечтой и надеждой для массовой электротехники, хотя она уже много лет используется в некоторых особых случаях. Например, в сверхсильных электромагнитах для ядерных исследований, где обычные электромагниты с обмотками из медного провода оказались бы ещё сложнее и дороже, чем сверхпроводниковые. Или там, где вообще невозможно было создать обычные электромагниты, которые давали бы нужной силы магнитное поле. Используют электромагниты со сверхпроводящими обмотками и в экспериментальных установках для термоядерного синтеза — для получения энергии из реакции объединения атомных ядер водорода в ядро гелия, то есть из реакции, которая в небольших по космическим меркам дозах воссоздаст технологию получения энергии звёзд, в том числе нашего Солнца.

Бесхитростные, казалось бы, трудяги-провода демонстрируют ещё одно интересное явление, не столь, может быть, важное, как сверхпроводимость, и не столь сложное по своей физической основе, но тоже поначалу похожее на необъяснимый фокус. С увеличением частоты активное сопротивление обычного проводника, оказывается, растёт, и весьма заметно. Это явление называется поверхностный эффект, или, иначе, скин-эффект, слово «скин» в переводе с английского означает «кожа».

Скин-эффект возникает потому, что переменное электромагнитное поле, созданное генератором и двигающее электроны в проводнике, из-за быстрых своих изменений и невысокой скорости распространения в металлах не успевает проникнуть вглубь провода. Поэтому в центральной его части тока нет вообще, высокочастотный ток реально движется лишь в поверхностном слое провода, что равносильно уменьшению его диаметра и, следовательно, росту сопротивления. На низких частотах, в частности, на сетевой частоте 50 Гц, поверхностный

эффект практически не ощущается, но, скажем, на частоте 2 мегагерца (2 МГц = 2 000 000 Гц) сопротивление медного провода диаметром 5 мм увеличится более чем в 50 раз в сравнении с его сопротивлением постоянному току.

За открытием скин-эффекта довольно быстро последовало его практическое использование. Например, при создании медного провода с высокопрочной стальной сердцевиной. Или тонкого серебряного покрытия на медном проводе, что снижает его сопротивление на высоких частотах. Очень полезным для машиностроения стало использование скин-эффекта для поверхностной закалки деталей. Эта технология — высокочастотная закалка — позволяет создавать ответственные стальные детали машин с незакалённой, а поэтому пластичной и очень прочной основой и с очень тонким закалённым сверхтвёрдым поверхностным слоем (Р-80).

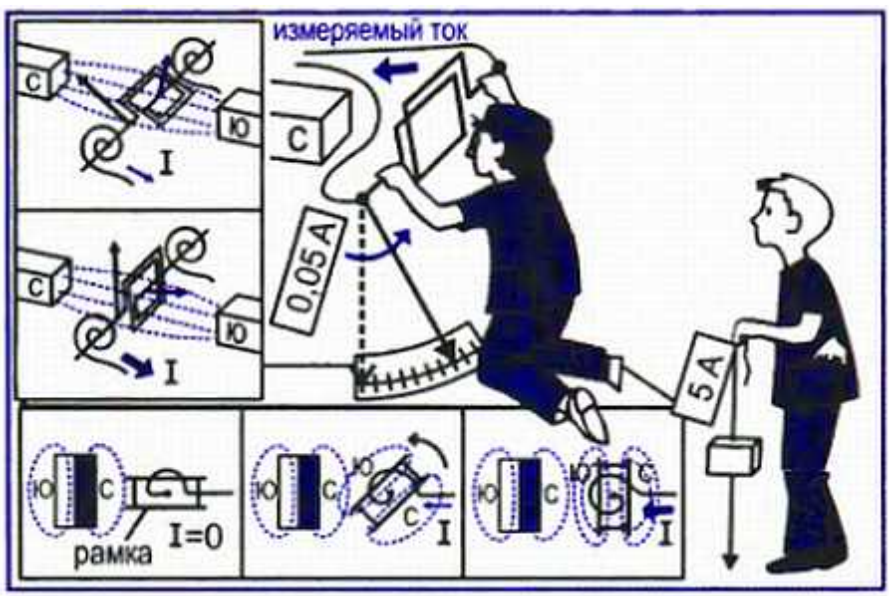


ВК-186. *Простой и неприхотливый электроизмерительный прибор — электромагнитный амперметр. Измеряемый ток проходит по катушке и втягивает стальной сердечник, с которым связана стрелка, двигающаяся по размеченной шкале. К прибору можно подвести ток в любой полярности — при её изменении сердечник перемагнитится и по-прежнему будет втягиваться в катушку. По тем же причинам прибором можно измерять постоянный и переменный ток, а несколько изменив катушку, и напряжение.*

Т-162. **«Генератор тока» и «генератор напряжения» — два варианта взаимоотношений между источником и потребителем электроэнергии.** В одном из предыдущих разделов было отмечено, что внутреннее сопротивление генератора $R_{внг}$ и сопротивление нагрузки $R_н$ образуют своего рода делитель напряжения, который делит электродвижущую силу E на две части — напряжение, которое остаётся на внутреннем сопротивлении генератора $U_{внг}$, и напряжение, которое достаётся нагрузке $U_н$ (Р-33). При этом $U_{внг}$ остаётся внутри генератора, а на его выходе, то есть на нагрузке, действует напряжение $\mathbf{U_н = E — U_{внг}}$. И далее был сделан вывод: желательно, чтобы внутреннее сопротивление генератора $R_{внг}$ было как можно меньше, так как при этом на нём будет оставаться меньшая часть э.д.с. и больше будет напряжение $U_г$, которое действует на выходе генератора, то есть достаётся нагрузке.

Напомнив об этой очевидной истине, нужно сделать неожиданное и, видимо, не очень понятное сообщение: в некоторых случаях сопротивление генератора $R_{внг}$ умышленно делают весьма большим, во всяком случае, оно во много раз больше, чем сопротивление нагрузки $R_н$.

Естественно, что при этом на выходе генератора действует малая часть э.д.с., так как основная её часть остаётся или, лучше сказать, теряется внутри генератора, на его большом внутреннем сопротивлении $R_{внг}$.



ВК-187. *Прибор, который может быть очень чувствительным и точным, — магнитоэлектрический гальванометр. Сам прибор измеряет слабые токи (обычно в несколько раз меньше 1 миллиампера), но с помощью небольших добавлений становится вольтметром постоянного и переменного напряжения, амперметром и омметром. Измеряемый во всех этих случаях ток подводится к квадратной катушке (рамке) через спиральные пружины, в зависимости от тока катушка со стрелкой отклоняется постоянным магнитом.*

Для чего это нужно? Зачем умышленно снижать выходное напряжение генератора? Зачем бесполезно терять в самом генераторе основную часть его мощности?

В поисках ответа рассмотрим простейшую схему, где к генератору переменного тока подключено одно сопротивление нагрузки. Предположим, что э.д.с. генератора (эффективное значение) $E = 220$ В, его внутреннее сопротивление $R_{\text{внг}} = 1000$ Ом, а сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$ может меняться от 1 до 10 Ом, то есть оно всегда во много раз меньше, чем $R_{\text{внг}}$. Легко подсчитать, что при изменении нагрузки общее сопротивление цепи меняется от 1001 до 1010 Ом, и согласно закону Ома ($\mathbf{I} = \mathbf{E}: \mathbf{R}_{\text{общ}}$) ток в цепи будет меняться от примерно 220 мА до примерно 218 мА.

Как видите, при изменении нагрузки в 10 раз ток в цепи меняется незначительно, примерно на 1 %. С учётом такого постоянства тока при изменении нагрузки подобный режим называется «генератор тока». В некоторых случаях он необходим, и ради постоянства тока при разной нагрузке мирятся с тем, что ей достаётся малая часть мощности, которую создаёт генератор.

Режим «генератор тока» нужен довольно редко, электричество практически всегда работает на нас в режиме «генератор напряжения»: в бортовой электросети автомобиля или катера, в карманном фонаре, в переносном приёмнике и, главное, в обычной нашей электросети. Чтобы получить режим «генератор напряжения», внутреннее сопротивление генератора $R_{\text{внг}}$ должно быть как можно меньше, во всяком случае, во много раз меньше, чем сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$. В этом случае основная часть э.д.с. и почти вся мощность генератора достаются нагрузке, внутреннее сопротивление $R_{\text{внг}}$ почти ничего не получит.

У «генератора напряжения», в отличие от «генератора тока», при изменении нагрузки $R_{\text{н}}$ напряжение на ней, то есть напряжение на выходе генератора, меняться почти не будет, но зато будет меняться общий потребляемый ток. Если вы, скажем, пришли домой и сначала зажгли одну лампочку у входной двери,

а затем включили люстру, телевизор и электрокамин, то напряжение, которое вы получаете от генератора, то есть из сети, практически не изменится, а общая потребляемая мощность возрастёт за счёт увеличения общего тока.

ВК-188. *В самых разных приборах часто встречаются измерители с цифровым отсчётом. В них дешифратор в виде небольшой микросхемы прежде всего преобразует измеряемый показатель, например напряжение, в двоичный код. А затем ещё один микроблок прибора преобразует этот код и в виде привычных нам цифр высвечивает результат на небольшом, обычно жидкокристаллическом, экране. Для многих удобно такое отображение результатов, а кто-то любит измерения стрелочным прибором.*

Проиллюстрируем режим «генератор напряжения» числовым примером. Электродвижущая сила E = 220 В, внутреннее сопротивление генератора $R_{внг}$ = 0,01 Ом, и могут быть два сопротивления нагрузки — $R_{н1}$ = 2200 Ом (лампа дневного света мощностью 22 Вт) и $R_{н2}$ = 220 Ом (люстра с соединёнными параллельно десятью такими лампами общей мощностью 220 Вт). Поскольку $R_{внг}$ очень мало, будем считать, что ток в цепи определяет только сопротивление нагрузки, и подсчитаем, что при включении $\mathbf{R}_{н1}$ этот ток равен $\mathbf{I}_1 = \mathbf{E}: \mathbf{R}_{н1}$ = 220 В: 2200 Ом = 0,1 А, а при включении ток равен I_2 = 220 В: 220 Ом = 1 А. При этом на внутреннем сопротивлении генератора остаётся

напряжение в первом случае 0,001 В и во втором случае в 10 раз больше, то есть 0,01 В. То есть практически нагрузке всегда достаются обещанные 220 вольт. Так что генератор напряжения независимо от того, какая к нему подключается нагрузка (разумеется, из числа допустимых для данной цепи), всегда подаёт на неё практически одно и то же напряжение.

Т-163. **Коэффициент полезного действия — цифра и символ.** Генератор тока и генератор напряжения вплотную подвели нас к характеристике, о которой давно уже пора сказать. Это коэффициент полезного действия, или сокращённо к.п.д., он даёт чрезвычайно важную оценку многим техническим системам, в том числе электротехническим. Коэффициент полезного действия показывает, какую часть получаемой мощности эта система расходует для полезного действия. Если, например, у какой-нибудь машины к.п.д. составляет 0,95, или, что то же самое, 95 %, то из каждых полученных 100 ватт мощности в машине безвозвратно теряется 5 %, то есть 5 Вт, чаще всего они превращаются в ненужное тепло. Ну а оставшиеся 95 Вт расходуются на какое-то полезное дело — неплохой результат, к.п.д. составляет 95 %. Часто к.п.д. обозначают греческой буквой η — она называется «эта».

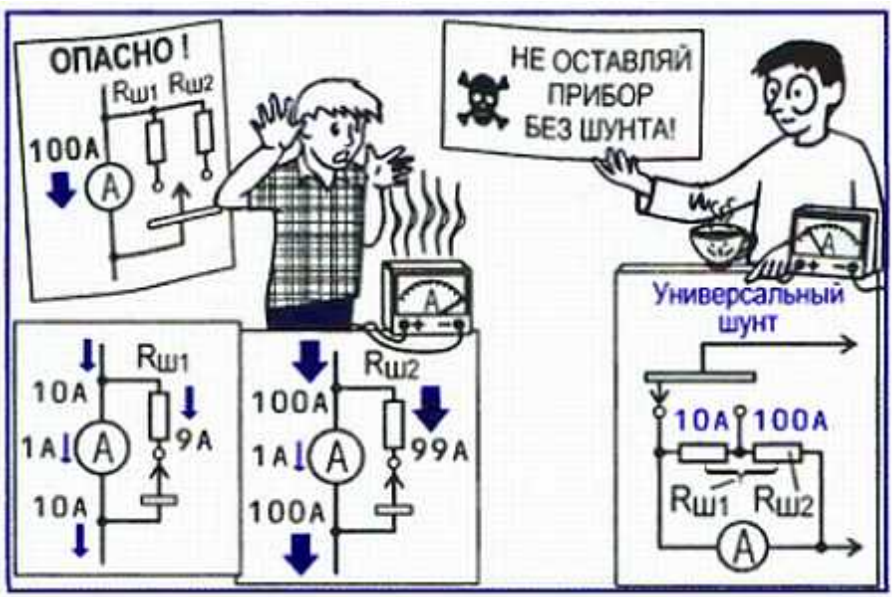
ВК-189. *Имея чувствительный гальванометр (ток 50-100 микроампер, отклоняющий стрелку до конца шкалы), можно создать на его основе многопредельный вольтметр, хорошо измеряющий как небольшие, так и большие напряжения. Чтобы*

увеличить измеряемое напряжение, нужно просто увеличить сопротивление, включённое последовательно с прибором. Собрав цепочку из трёх резисторов или подключив к прибору три отдельных резистора, можно получить вольтметр для трёх разных напряжений.

У представителей окружающей нас техники встречается самый разный к.п.д. Скажем, у некоторых типов электрических лампочек он составляет 0,05, то есть 5 %, — всего лишь 5 % полученной электрической мощности эта лампочка превращает в свет. У лампы дневного света к.п.д. уже около 30 %. Если учесть энергию, которая содержится в сжигаемом топливе, то окажется, что у бензинового автомобильного двигателя к.п.д. около 30 %, а у дизеля около 40. У электрических двигателей к.п.д. достигает 95 %, а у некоторых трансформаторов даже 98 %. Долгое время примером недопустимых потерь энергии был паровоз, уже почти забытая железнодорожная машина с паровым котлом и угольной топкой. У паровоза к.п.д. доходил до 4–5 %, то есть 95–96 % полученной из топлива энергии он попросту выбрасывал.

Коэффициент полезного действия не только техническая характеристика, но и некий символ, которым пользуются, чтобы дать оценку самым разным объектам и процессам, в том числе человеческой деятельности. Бывает, так и говорят, что у работника N наблюдается низкий к.п.д., что он, работник N, много суетится, а результатов особых нет. Или что предприятие М работает с очень малым коэффициентом полезного действия, средств потребляет много, а продукция мизерная.

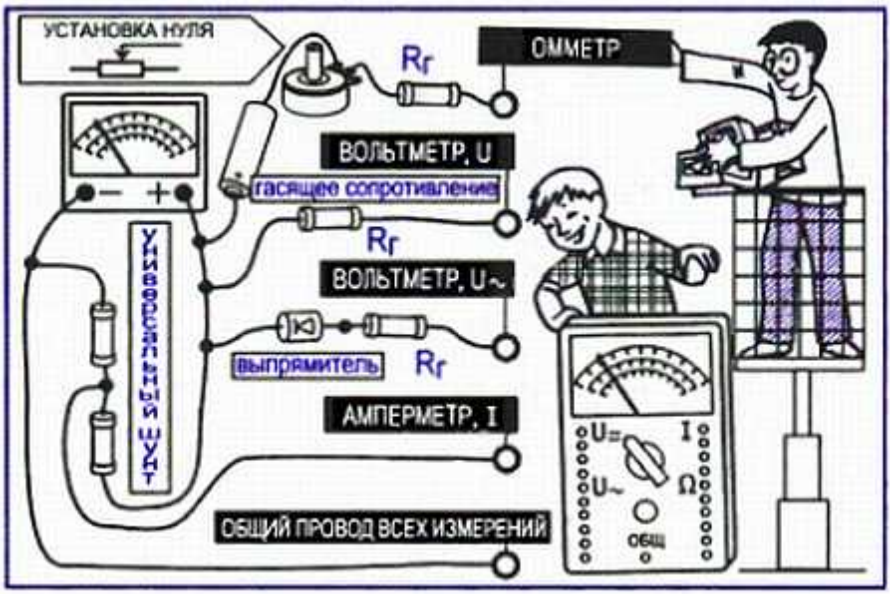
Вместе с тем бывает, что приходится сознательно идти на понижение к.п.д. для достижения какой-то особо важной цели. Наглядный пример — «генератор тока». Мы умышленно увеличили внутреннее сопротивление генератора, то есть увеличили бесполезные потери энергии и тем самым снизили к.п.д. до малых долей процента. Это было сделано для того, чтобы получить неизменный ток в цепи при изменении нагрузки — в каком-то случае решение задачи стоит очень серьёзных жертв. К счастью, в наиболее распространённых электротехнических системах, в частности, в снабжающих нас энергией электрических сетях, нужен режим «генератор напряжения», а для него необходимо малое внутреннее сопротивление генератора, малые внутренние потери, и, следовательно, это режим с высоким к.п.д.



ВК-190. *Чтобы создать многопредельный амперметр, нужно подключать к гальванометру шунты с разным сопротивлением. И здесь появляется серьёзная опасность: если менять шунты, то переключатель, выполняя эти операции, может на мгновение оставить прибор вообще без шунтов и вывести его из строя большим током. Чтобы избежать такой неприятности, используют безопасный универсальный шунт — он всегда подключён к прибору, а переключатель лишь соединяет его с отводами универсального шунта.*

Т-164. **Качество работы оценивает тригонометрия (косинус фи).** Во всех последних разделах, как и во многих предыдущих, фигурировали электрические цепи, где к генератору подключается чисто активная нагрузка, представленная тем или иным сопротивлением $R_н$. Но так бывает далеко не всегда — в цепях переменного тока к генератору часто подключены не только чисто активные, но ещё и реактивные элементы, конденсаторы и особенно часто катушки индуктивности. Так, например, если к генератору через трансформатор подключена группа уличных фонарей, то на эквивалентной схеме всей этой цепи должно быть не только активное сопротивление R, отображающее сами осветительные приборы, но ещё и индуктивное сопротивление X_L, отображающее индуктивность трансформаторных обмоток. Точно так же должна выглядеть эквивалентная схема электрического двигателя — сопротивление R отображает активную часть нагрузки, то есть в итоге ту

механическую работу, которую выполняет двигатель, а в индуктивном сопротивлении X_L представлена индуктивность его обмоток (Р-83).



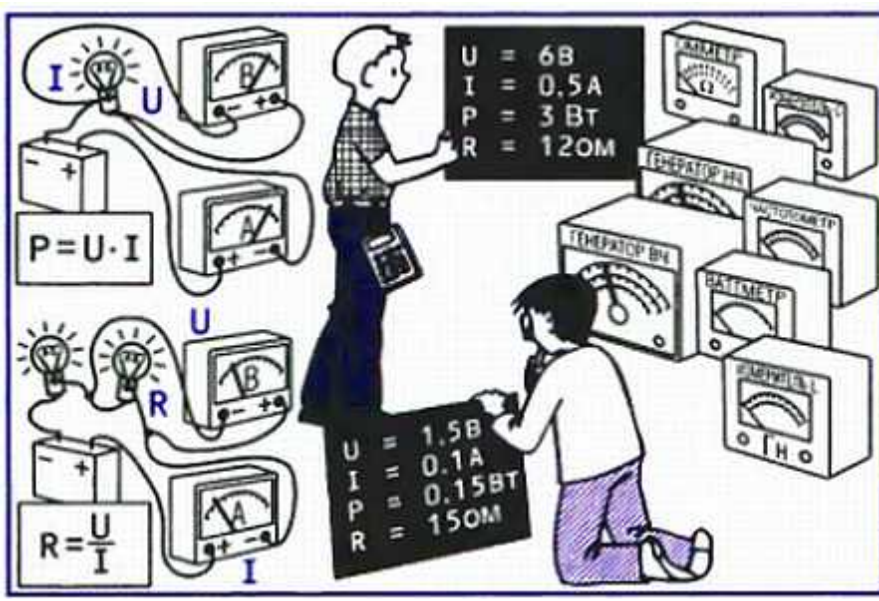
ВК-191. *Подбираясь к концу короткого путешествия в мир измерительных приборов, нужно сказать несколько слов о приборе, который в наше время стал таким же обязательным для каждого дома, как, скажем, молоток или отвёртка. Имя этого прибора «авометр», что означает амперметр, вольтметр и омметр. Его основа — один чувствительный магнитоэлектрический гальванометр, к которому подключены универсальный шунт, выпрямитель, гальванический элемент и гасящие сопротивления.*

На первый взгляд может показаться, что учитывать реактивное сопротивление не так уж и обязательно — мощности оно не потребляет, то, что в какой-то момент берёт от генератора, почти сразу же и отдаёт. Но не нужно забывать, что ток, который туда-обратно без потерь прокачивается через катушку, проходит по соединительным проводам, по линиям электропередачи и в них отдаёт определённую мощность, отобранную в итоге у генератора. И хотя сами реактивные элементы мощности не потребляют, проходящий через них ток создаёт потери в других элементах цепи, прежде всего во внутреннем сопротивлении генератора. Поэтому желательно, чтобы реактивная составляющая общего тока была как можно меньше или, иными словами, чтобы как можно большая часть общей мощности, циркулирующей в

данной цепи переменного тока, приходилась на реально работающую, на активную составляющую тока.

Имеется особая характеристика, которая оценивает долю активной составляющей в общей мощности, потребляемой каким-либо устройством. Называется эта характеристика $\cos \varphi$ (произносится «косинус фи», греческая буква «фи»), или, иначе, коэффициент мощности. Он показывает, какую часть общей потребляемой мощности составляет активная мощность, и может лежать в пределах от 0 до 1. Если коэффициент мощности равен нулю ($\cos \varphi = 0$), то вся поступающая в данную электрическую цепь мощность — реактивная. А если коэффициент мощности равен единице ($\cos \varphi = 1$), то реактивной составляющей у потребляемой мощности вообще нет, вся мощность, полученная от генератора, расходуется в чисто активной нагрузке.

Как уже отмечалось, желательно, чтобы реактивная составляющая общей потребляемой мощности (мощность, как всегда, это произведение тока на напряжение) была как можно меньше, а активная составляющая — как можно больше. Иными словами, желательно, чтобы у потребителя косинус фи был как можно выше, как можно ближе к единице.



ВК-192. *Полезное приложение к измерительным приборам — это умение быстро производить в уме простейшие вычисления, которые могут заменить ряд измерений, особенно если подсчитываемую величину нечем измерить. В числе легко вычисляемых показателей сопротивление и мощность, когда*

известны ток и напряжение или индуктивность катушки, когда известны ёмкость и резонансная частота. При расчётах не стремитесь к особой точности, но будьте внимательны при определении порядка величины.

Т-165. **Трансформатор — машина для преодоления расстояний**. Много и иногда довольно подробно размышляя о трансформаторе, мы пока ещё не сказали о нём нечто особо важное: именно трансформатор сделал возможной передачу электричества на большие расстояния.

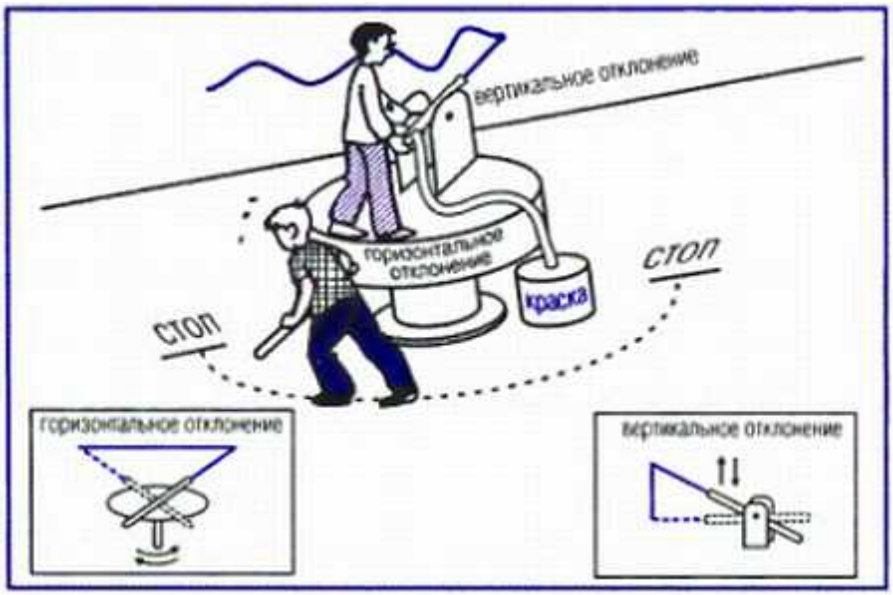
Для начала вспомним, что электрическая мощность — это напряжение, умноженное на ток, $\mathbf{P = U \cdot I}$ (Р-37). И что одну и ту же мощность P можно получить при самых разных соотношениях между U и I, в частности, при большом напряжении U и малом токе I или при большом токе I и малом напряжении U. Простой пример: $P = 200$ Вт $= 200$ В·1 А $= 1$ В·200 А $= 50$ В·4 А $= 2$ В·100 А $= 2000$ В·0,1 А и так далее.

При передаче электрической мощности часть её теряется в проводах, соединяющих генератор и нагрузку, то есть теряется в соединительной линии. Потери эти тем больше, чем больше идущий по линии ток, и поэтому передавать электроэнергию желательно при большом напряжении и малом токе. В то же время потребителю по ряду причин, в том числе из соображений безопасности, нужно напряжение не очень высокое, примерно 100–200 вольт, а оно совершенно непригодно для передачи электроэнергии на большие расстояния.

Представим себе, что в небольшой дачный поселок из 100 домов по воздушной линии длиной всего 5 километров нужно передать мощность 200 киловатт — по два киловатта на домик. Это довольно скромно — несколько лампочек, телевизор, холодильник, пара вентиляторов. Мы обнаружим просто ужасающую картину, подсчитав, что будет, если по медному проводу диаметром 4–5 миллиметров передавать эту мощность напрямую с генератора с таким расчётом, чтобы у потребителя было напряжение 200 вольт. Получится, что при полной нагрузке по линии пойдёт огромный ток, и он потеряет в проводах линии во много раз большую мощность, чем получит потребитель. Ещё более абсурдными получатся результаты расчётов, если представить себе передачу энергии подобным способом для большого города и на большое расстояние. И ничего здесь не сделаешь, против закона Ома не пойдёшь.

Решение неразрешимой, казалось бы, задачи подарил большой электроэнергетике простой и скромный трансформатор. На входе в линию электропередачи он повышает напряжение в

десятки, сотни и даже в тысячи раз, а на выходе понижает его до нужной потребителю величины (Р-78). В итоге по линии мощность идёт при высоком напряжении и небольшом токе, а значит, потери в линии невелики. В принципе всё до смешного просто, хотя, конечно, в реальных электрических сетях работают достаточно сложные, крупные и совершенные системы.

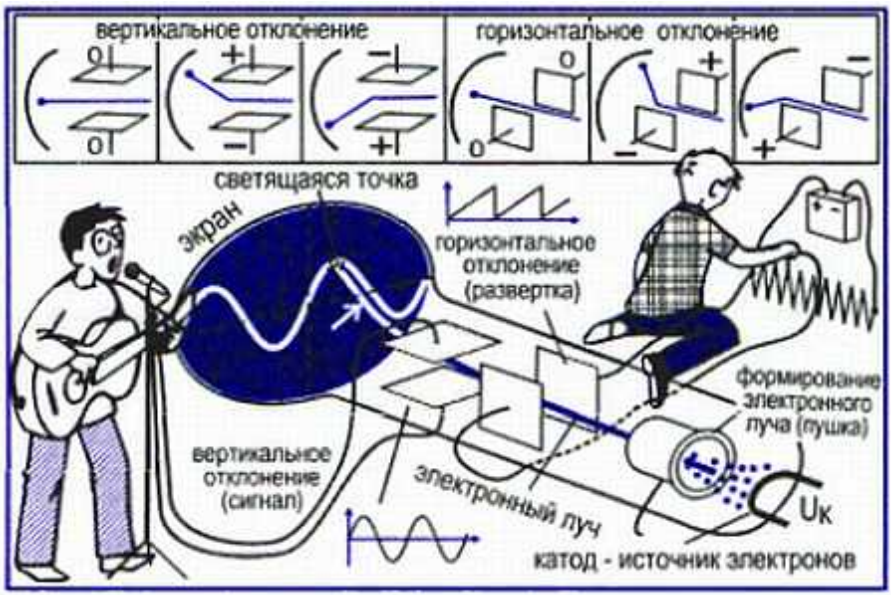


ВК-193. *Осциллограф — ещё один прибор для изучения того, что происходит в невидимом электрическом мире. На экране своей электронно-лучевой трубки он рисует самый настоящий график поступившего к нему на вход переменного тока. Горизонтальное движение луча трубки создаёт для этого графика горизонтальную ось — ось времени. Одновременное вертикальное смещение луча отмечает все изменения тока, то есть рисует сам график тока. Смещение луча слева направо и вверх-вниз — основная идея прибора.*

Т-166. **Трое в одной лодке и в общем магнитном поле.** Из наполненной добродушным юмором повести Джерома К. Джерома «Трое в лодке» извлечём важный для нас факт: путешественников было трое, а лодка была одна. Повесть появилась немногим более ста лет назад, когда инженеры создали свой вариант использования чего-либо «на троих», — они объединили в одной машине три электрических генератора, придумали систему трёхфазного переменного тока.

Мы уже знаем, что если вращать проволочную рамку в

магнитном поле, то благодаря электромагнитной индукции в рамке наведётся э.д.с. А можно в общем магнитном поле вращать сразу несколько рамок или иных обмоток ротора и с каждой из них при этом получать э.д.с. (Р-92). Каждая такая рамка фактически представляет собой отдельный генератор, именуется он фаза, а вся система называется многофазной или трёхфазной, при трёх обмотках (рамках). Здесь мы ещё раз встречаемся с омонимами, с одинаковыми по написанию и звучанию словами, имеющими совершенно разное значение (вспомните слово «сила»). В многофазном генераторе фаза — это отдельный, самостоятельный источник Э.Д.С., совсем не то, что фаза как момент времени, соответствующий какому-либо событию, например, появлению амплитуды переменного тока (Р-57).



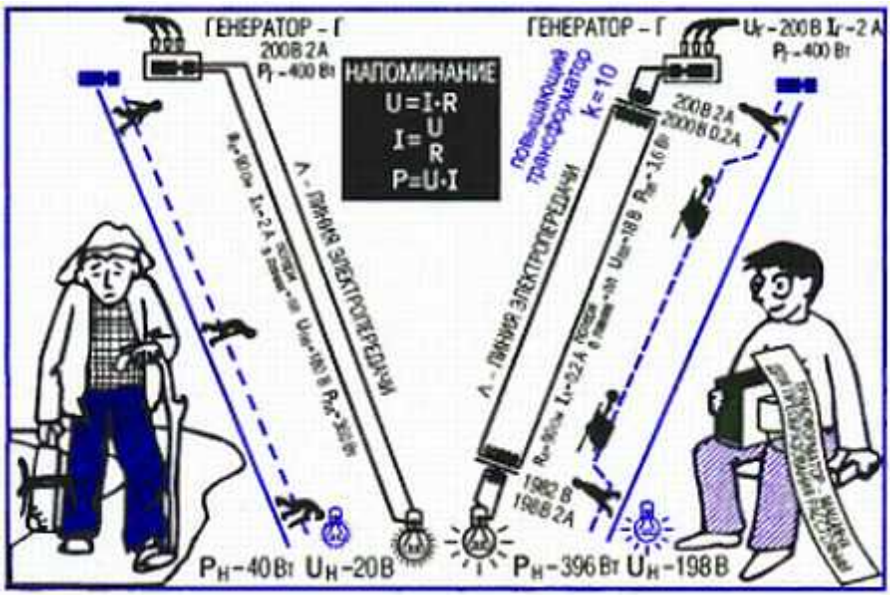
ВК-194. *Основной элемент осциллографа, его электронно-лучевая трубка, даже в упрощённом виде смотрится сложным прибором. Из сильно разогретого током катода вылетают электроны и попадают в трубку, где из них формируется тонкий электронный луч. Попав в экран, покрытый светящимся веществом, луч создаёт на нём яркую точку, а при движении линию. На пути к экрану луч проходит две пары отклоняющих пластин. Напряжение на них взаимодействует с лучом, отклоняет его и рисует график.*

Не нужно думать, что многофазная система даёт какой-то многократный энергетический выигрыш, скажем, сама по себе в

несколько раз увеличивает мощность генератора. Генератор — это всего лишь преобразователь энергии, его выходная, то есть электрическая, мощность зависит от того, какая к генератору подводится механическая мощность, с какой силой вращает его ротор паровая турбина или дизель-мотор. Как ни увеличивай число рамок, а генератор не может выдавать больше энергии, чем получает. Многофазная система имеет, однако, другое важное достоинство — она позволяет по-разному соединять и использовать отдельные её фазы, и это порой даёт весьма ощутимый выигрыш.

Особо широкое распространение получили трёхфазные системы переменного тока, они лежат в основе практически всей современной индустрии производства, передачи и использования электрической энергии. Трёхфазный генератор упрощённо можно представить себе как вращающиеся в общем магнитном поле три рамки, равномерно распределённые по окружности, каждая рамка смещена по отношению к соседней на угол 120°. Каждая рамка — это фаза трёхфазного генератора, она выходит во внешний мир через свою пару контактных колец со скользящими отводами. Фазы могли бы работать самостоятельно, как три однофазных генератора, но никакого выигрыша это не даст.

Выигрыш, и немалый, можно получить, соединив фазы внутри генератора, причём есть два варианта соединений — звезда и треугольник (Р-92.4, Р-92.5). От всей системы трёх вращающихся рамок при соединении звездой достаточно четырёх выводов, при соединении треугольником — трёх. В случае звезды общий для всех трёх фаз провод называется нулевым, или нейтральным. Причём в генераторе и у потребителя фазы могут быть соединены по-разному, например, в генераторе звездой, а в нагрузке треугольником. Но в любом случае к потребителю от генератора отправляются три напряжения, сдвинутых по фазе на 120°. Здесь слово «фаза» уже относится к измерению времени, а сдвиги по времени появляются потому, что рамки пересекают магнитное поле последовательно, одна за другой, с запаздыванием на третью часть своего полного оборота, то есть на третью часть периода, на 120°.



ВК-195. *На рисунке показаны два варианта передачи электрической мощности на большие расстояния. В первом случае (слева) без каких-либо преобразований передаётся полученная с электростанции мощность 400 Вт при напряжении 200 В. Во втором случае (справа) передаётся та же мощность, но перед отправкой напряжение повышают до 2000 В, а при передаче потребителю понижают примерно до 200 В. И вот вам результат: во втором случае потребитель из 400 Вт получил 396 Вт, а в первом случае всего 40.*

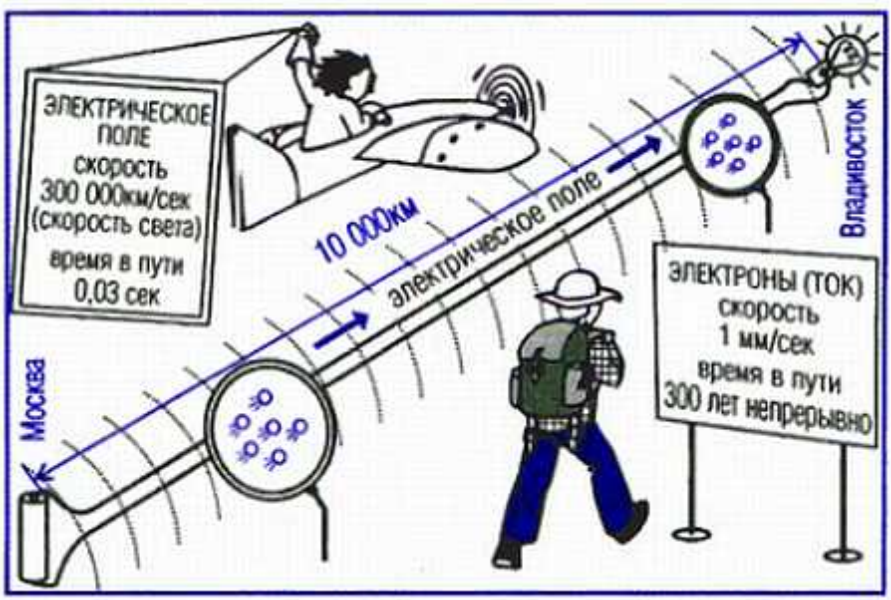
В создании и использовании трёхфазных систем энергоснабжения есть немало важных особенностей и тонкостей, о некоторых нельзя не сказать несколько слов.

В больших электрических сетях у генератора или (и) у промежуточного мощного трансформатора, фазы, как правило, соединены звездой, и к потребителю приходят четыре провода — три основных, как их называют, линейных провода и нулевой провод (Р-93). При этом потребителю можно доставлять электроэнергию в полном, в трёхфазном варианте, а можно подвести к нему только одну фазу, что, как правило, и получаем мы с вами — в наши квартиры приходят лишь два провода, нулевой и один из линейных. То есть из трёх фазовых напряжений мы получаем одно, одну фазу, две другие, но тоже по одной, получают соседние подъезды или соседние дома. Таким образом, все три фазы по возможности равномерно нагружены.

От источника электроэнергии (генератор, трансформатор),

соединённого звездой, можно получить и другое напряжение, оно называется линейным и снимается с двух линейных проводов, то есть с выводов соседних фаз. Фактически линейное напряжение $U_л$ есть сумма двух фазовых напряжений $U_ф$, но поскольку они сдвинуты по фазе на 120°, то при их суммировании напряжение $U_ф$ не удваивается. Линейное напряжение в 1,7 раза больше фазового, то есть в сети, где $U_ф$ = 127 В, линейное напряжение $U_л$ = 220 В, в самых распространённых сетях, где $U_ф$ = 220 В, линейное напряжение $U_л$ = 380 В, это цифры, узаконенные стандартами многих стран. В квартиры линейное напряжение обычно не вводят, его используют большей частью на производстве, где легче контролировать соблюдение правил безопасности и где мощности нужны побольше.

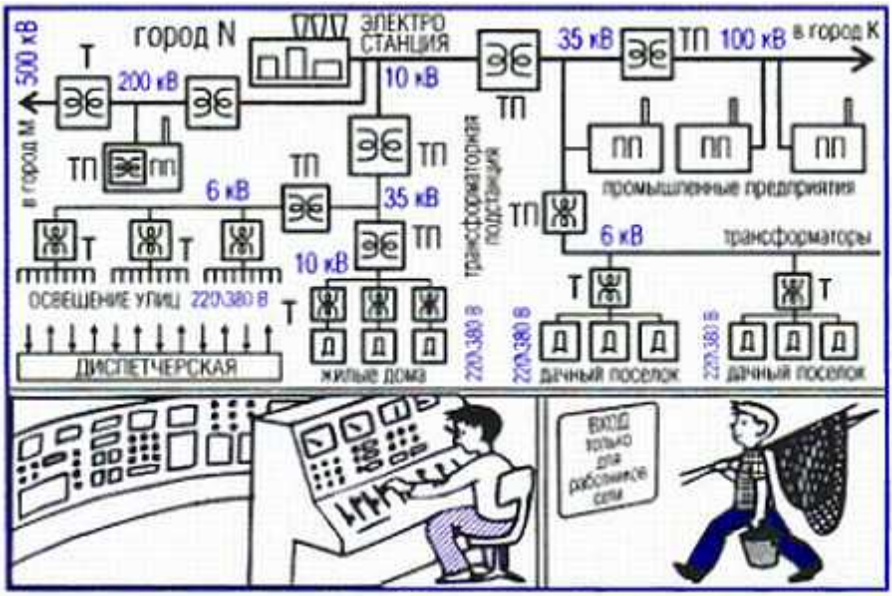
Важная характеристика трёхфазной цепи — её симметричность, равномерность нагрузки для всех трёх фаз. Она снижает потери в линиях электропередачи, а при идеально одинаковой нагрузке ток в нулевом проводе равен нулю, и провод этот вообще не нужен. Существенная неравномерность нагрузки заметно повышает потери, а в аварийной ситуации — при коротком замыкании одной из фаз — два других фазовых напряжения могут подскочить до уровня линейных. То есть в сети 220 В напряжение может подняться до 380 В, что, конечно, иначе чем катастрофой не назовёшь. К счастью, до неё, как правило, не доходит, автоматы мгновенно разрывают короткозамкнутую цепь, а если нужно, снимают напряжение с двух нормальных фаз.



ВК-196. *Каждый из нас слышал об огромной скорости электрического тока — из Владивостока в Москву телеграфный сигнал приходит за 0,03 секунды. Поэтому очень странное впечатление производят сообщения о том, что электроны, создающие ток, проходят лишь несколько миллиметров в секунду. Вместе с тем это верно и никак не противоречит первой цифре. При включении электрической цепи электрическое поле вдоль неё мчится со скоростью света, и медленные электроны начинают двигаться сразу во всей цепи.*

Т-167. **Магнитное поле быстро вращается, перемещается по кругу, наполняя силой электрические мускулы планеты**. Почти в одно время с изобретением трёхфазных систем, то есть более ста лет назад, был придуман способ создания с их помощью вращающегося магнитного поля. От трёх фаз трёхфазного генератора к трём электромагнитам статора подводят сдвинутые по времени три тока. Электромагниты равномерно расположены по кругу, то есть со смещением на угол 120° (Р-74). Каждая катушка электромагнита получает, так сказать, свой фазовый ток, и во время амплитуды этих своих фазовых токов электромагниты будут поочередно, один за другим, создавать своё максимальное магнитное поле. В итоге это максимально сильное поле будет перемещаться по кругу, будет вращаться.

Если в такое вращающееся магнитное поле поместить короткозамкнутую рамку, то в ней наведётся ток, он создаст своё магнитное поле, это поле будет схвачено (Т-8) внешним, вращающимся полем, и рамка начнёт вращаться вместе с ним. Эта маленькая хитрость открыла путь к созданию очень простых, надежных и эффективных асинхронных двигателей переменного тока, во всём мире они стали основным электрическим работником и выпускаются миллионными тиражами. Уже одного этого достаточно, чтобы назвать многофазные системы невидимым миру великим изобретением.

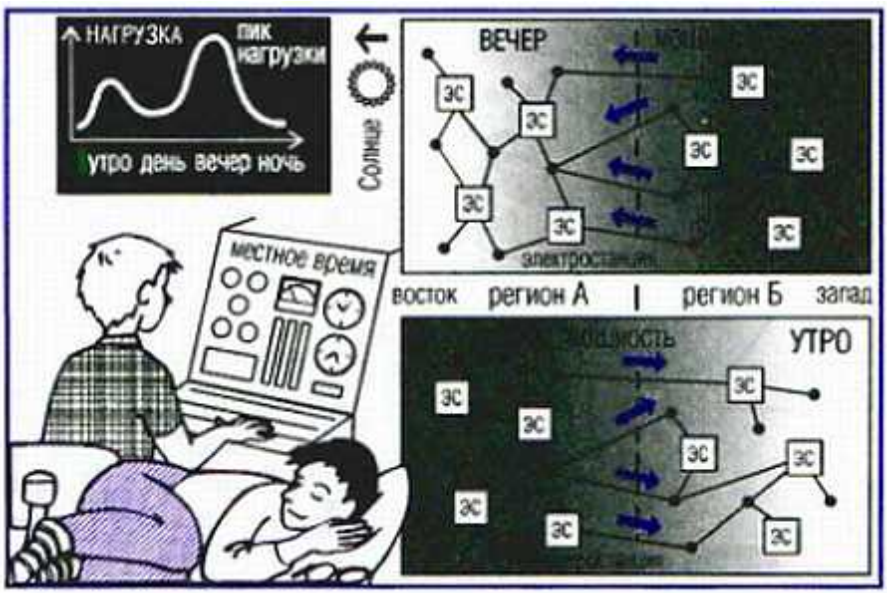


ВК-197. *Диспетчерская, управляющая электрическими сетями, большое и сложно устроенное предприятие. Измерительные приборы сообщают дежурным о токах и напряжениях на различных участках сети, о состоянии оборудования, о мощности, потребляемой на отдельных участках. Система широко использует вычислительную технику и автоматы, подающие предупредительные сигналы. Есть автоматы, которые в бесспорной ситуации сами производят отключения, предупреждая аварийное развитие событий.*

Т-168. **Электричество — незаменимый посредник**. Известная поговорка «Земля — кормилица» напоминает: всё, что мы употребляем в пищу, в итоге даёт нам земля. На ней произрастают зерновые культуры, фрукты, овощи, она даёт мясные и молочные продукты, поскольку на земле выращиваются корма. И только не знающий жизни новоприбывший марсианин может понять приведённую выше поговорку в том смысле, что мы кормимся непосредственно землёй, именно её употребляем в пищу.

Если задуматься о существе дела, то окажется, что земля — особого рода посредник, она собирает различные химические вещества, влагу и передаёт их растениям, помогая им набирать массу и превращаться в хлеб, сахар, любительскую колбасу, клубничное мороженое. Всё это чем-то напоминает роль электричества — оно тоже своего рода посредник, при содействии которого в бригаду человека собираются машины-помощники.

Электрическую энергию получают в огромных количествах из других видов энергии — тепловой, химической, световой, из механической работы. Но никогда (или, скажем более аккуратно, почти никогда) полученную электрическую энергию не используют в чистом виде, например, в виде электрического поля или магнитного. Электричество в итоге превращают в то, что непосредственно нужно человеку, главным образом в световую и тепловую энергию и, конечно, в очень нужную, как мы её называем, механическую работу.



ВК-198. *В странах, имеющих большое протяжение с востока на запад, а также в группах стран, по высоковольтным линиям передаются большие мощности. С их помощью можно, не строя новых станций, удовлетворять пиковую нагрузку, например в утренние и вечерние часы. При этом в какой-либо регион в период высокой нагрузки передают большую мощность из региона, где этот период только что прошёл. Там уже наступила глубокая ночь со сравнительно небольшим потреблением электроэнергии.*

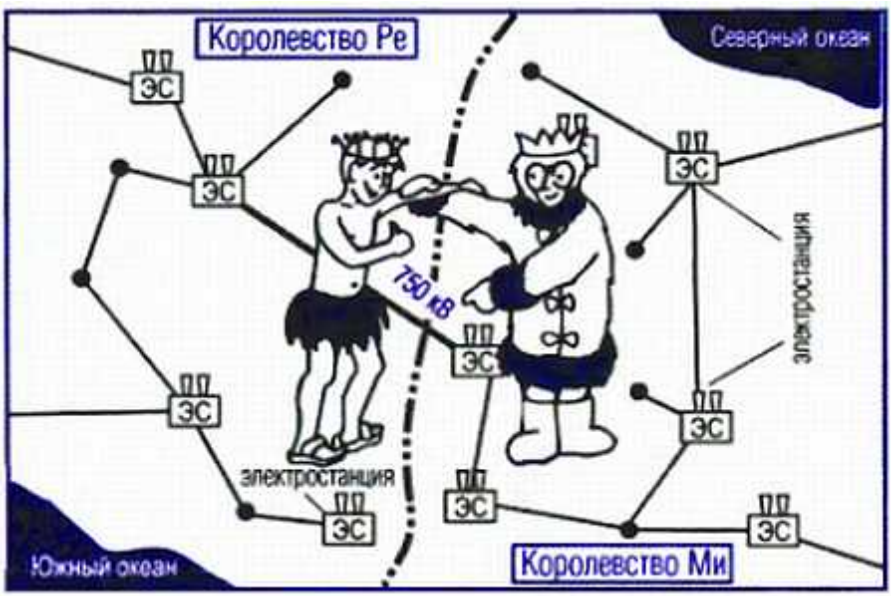
Типичная схема участия электричества в нашей жизни очень проста. На электростанции в топках паровых котлов сжигают уголь, газ или мазут, пар высокого давления вращает паровую турбину, она приводит в движение ротор электрогенератора, генератор вырабатывает электрическую энергию, которая по проводам приходит к потребителю и вращает моторы станков в заводском цехе или накаливает добела нити многих тысяч

электролампочек, освещающих наши квартиры и улицы ночного города. Таким образом, электричество и выполняет роль посредника в системе тепло-электричество-тепло, или тепло-электричество-свет, или тепло-электричество-механическая работа.

Но зачем, спрашивается, нужен этот посредник? Зачем эта громоздкая и дорогая система электростанций и линий электропередачи? Для чего мириться с потерями энергии, неизбежными при любом её преобразовании, например, при преобразовании тепла в электричество или электричества в тепло? Почему нельзя без электричества на месте получать тепло и свет, сжигая тот же газ? Почему бы не получать на месте механическую работу без электричества, используя, например, бензиновые двигатели разной мощности?

Можно привести множество цифр, расчётных формул, таблиц и графиков, которые неотвратимо докажут, что посредник-электричество не ест хлеб зря. Достаточно вспомнить, что сами электрические машины, участвующие в преобразовании энергии, такие как электрогенераторы, электродвигатели, трансформаторы, работают с высоким коэффициентом полезного действия, потери в них, как правило, не превышают несколько процентов. Если подсчитать всё, что теряется, и всё, что выигрывается, то окажется, что электричество в итоге не только не разбазаривает какую-то часть общей исходной энергии, а наоборот — в огромных количествах её сберегает.

При этом электричество позволяет транспортировать энергию на большие расстояния, и не по трубам, не в железнодорожных составах, не морскими супертанкерами, а по сравнительно тонкому медному или алюминиевому проводу. И с очень малыми потерями. Электричество позволяет легко делить энергию на любые порции и без проблем развозить её множеству потребителей, например, доставлять к каждому рабочему месту на большом заводе или в каждую квартиру большого многоэтажного дома. Электричество позволяет с лёгкостью менять режим работы самых разных машин-исполнителей, например, менять число оборотов электродвигателя, крутящий момент на валу или яркость свечения электроламп.



ВК-199. *В современном мире производство электрической энергии уже давно стало объектом большого бизнеса и активных межгосударственных экономических отношений. Страны, имеющие благоприятные условия для производства электроэнергии, в том числе за счёт альтернативных источников, например солнечного излучения, ветра или приливов, могут активно развивать эти отрасли индустрии, получая более крупный или более быстрый экономический эффект, чем при развитии других областей.*

Можно без графиков, цифр и формул заметить замечательные достоинства электричества, достаточно лишь немного воображения. Вы, скорее всего, не захотите использовать в своём доме керосиновые лампы или светильники с газовыми горелками вместо ярких, без гари и копоти электрических ламп, которые можно мгновенно включить или выключить лёгким нажатием на кнопку. Производственники наверняка не захотят заменить токарные и фрезерные станки с электроприводом на станки, которые, как в старину, с помощью ременных передач приводятся в движение от проходящего вдоль всего цеха общего вала, связанного с паровой машиной. И вряд ли кто-нибудь захочет купить пылесос, магнитофон или вентилятор, в которых вместо бесшумных электродвигателей работают бензиновые моторчики. Не говоря уже о том, что магнитофон, а также телевизор, телефон, радиоприёмник, компьютер, рентгеновский аппарат и многие другие уже привычные чудеса техники без электричества вообще немыслимы.

Так что, сравнивая два варианта нашей жизни — с электричеством и без электричества, можно уверенно сказать, что электричество удобнее. Оно удобно и выгодно. Оно удобно, выгодно и открывает такие возможности, о которых и мечтать нельзя было до того, как на помощь человеку пришло электричество.

Отметив этот очевидный факт, мы вплотную подошли к рассказу о практическом использовании электричества, о конкретных электрических приборах, машинах и системах.

Глава 16
Главное о главных

Жители городов, вечерами залитых электрическим светом, пассажиры электропоездов и владельцы электрических кофеварок, мы редко задумываемся о том, как пришло к нам всё это электрическое богатство. И часто даже не знаем, что ещё чуть более ста лет назад лишь в нескольких десятках столичных квартир горели электрические лампочки, а весь остальной народ ещё жёг свечи и керосиновые лампы.

Главный герой электроэнергетики — мощный электрический генератор. Но он не работает один — ему непременно нужен мощный двигатель, который будет перемещать основную обмотку генератора в магнитном поле, преодолевая сильнейшее его сопротивление. Сегодня в мировой энергетике сложилось несколько групп таких очень сложных технических систем, от их стабильной работы и их развития зависит благополучие каждого из нас.

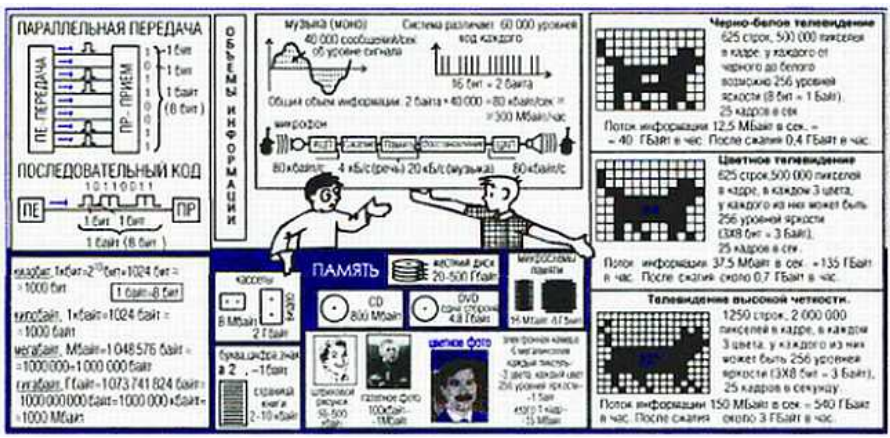
Т-169. **Требуются силачи.** Принцип действия электрического генератора нам в своё время пояснила проволочная рамка, которую мы вращали в магнитном поле (Р-55, Р-56). При этом не говорилось, кто именно, какое устройство осуществляет вращение, поскольку это безразлично — рамку можно вращать любым способом, главное, чтобы она вращалась, чтобы её провода пересекали магнитное поле. Можно, например, представить себе, что рамку вращает какой-нибудь простенький бензиновый моторчик, из числа тех, что дети ставят на свои летающие модели самолётов.

На настоящей электростанции настоящий генератор вместе с двигателем входит в единую сложную систему, и в дальнейшем будет рассказано о нескольких таких системах, представляющих основные направления электроэнергетики. Но перед этим уместно вспомнить, что при знакомстве с электрическими генераторами рано или поздно откуда-то обязательно выплывает коварный вопрос, как говорят студенты, вопрос на засыпку. Излагается он примерно так: почему, чтобы вращать ротор генератора, нужны мощные двигатели? Пусть он даже очень тяжёлый, этот ротор, но подшипники у него наверняка хорошо смазаны, и, скорее всего, можно и вручную ротор провернуть. Для

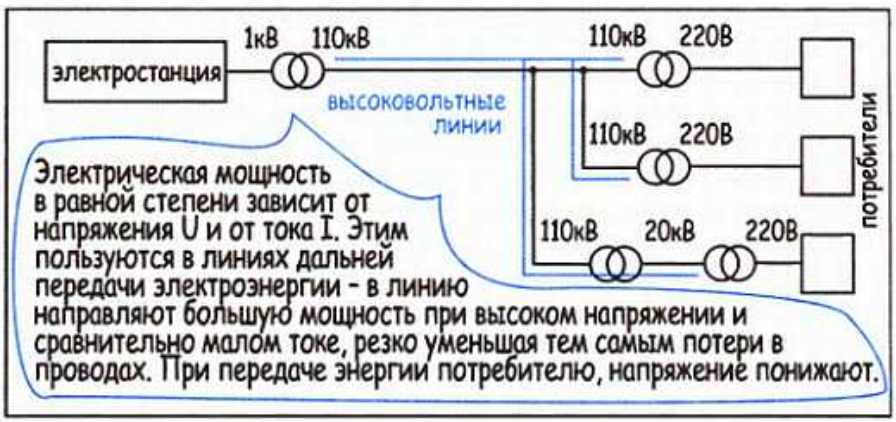
чего же тогда двигателю такая большая мощность?

Сначала общий ответ: электрогенератор не источник энергии, а всего лишь её преобразователь — чтобы получить от генератора электрическую мощность 100 тысяч киловатт, нужно в каком-то виде дать ему никак не меньше, а реально нужно с несколько большей мощностью (с учётом потерь) вращать ротор этого генератора. За конкретным пояснением обратимся к нашей экспериментальной установке — к простейшему генератору в виде рамки, которая вращается в магнитном поле, и наведённую в ней э.д.с. выдаёт во внешнюю электрическую цепь.

В режиме холостого хода, когда нагрузки нет, тока тоже нет и мощность от рамки не потребляется, вращать её действительно нетрудно. Но если вращать рамку и подключить к ней нагрузку, то наведённая э. д.с. создаст в цепи ток, а он, проходя по самой рамке, будет взаимодействовать с внешним магнитным полем. Вспомните обнаруженный нами когда-то факт: проводник, по которому идёт ток, выталкивается из магнитного поля, так собственное магнитное поле проводника взаимодействует с внешним полем. Если по правилу правой руки определить полярность э.д.с., наведённой в проводах рамки, а по правилу левой руки определить направление выталкивания проводников, то окажется, что выталкивание направлено против вращения рамки. А это значит, что силу выталкивания нужно преодолеть, если мы хотим вращать рамку и получать от неё какую-то электрическую мощность. Чем больше потребляемая от рамки (от генератора) мощность, тем больше ток в цепи (а значит, и в рамке), тем больше выталкивающая сила, которую нужно преодолеть, тем, следовательно, больше должна быть сила, которая вращает рамку. Вот почему нужны мощные первичные двигатели, которые поставляют механическую энергию для мощных электрогенераторов.


ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ ПЕРЕДАЧА
ПЕ-ПЕРЕДАЧА
ПР-ПРИЕМ
1 бит
1 бит
1 байт (8 бит)
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ КОД
10110011
ПЕ
ПР
1 бит 1 бит
1 байт (8 бит)
ОБЪЕМЫ ИНФОРМАЦИИ
Музыка (моно)
Система различает 60 000 уровней
40 000 сообщений/сек
об уровне сигнала
код каждого
16 бит = 2 байта
Общий объем информации: 2 байта • 40 000 = 80 кбайт/сек =
= 300 Мбайт/час
микрофон
80 кбайт/с
4 кбит/с (речь) 20 кбит/с (музыка)
80 кбайт/с
Черно-белое телевидение
625 строк, 500 000 пикселей в кадре, у каждого от черного до белого возможно 256 уровней яркости (8 бит = 1 байт), 25 кадров в сек
Поток информации 12,5 Мбайт в сек. =
= 40 Гбайт в час. После сжатия 0,4 Гбайт в час.
Цветное телевидение
625 строк 500 000 пикселей в кадре, в каждом 3 цвета, у каждого из них может быть 256 уровней яркости (3X8 бит = 3 байт), 25 кадров в сек.
Поток информации 37,5 Мбайт в сек. = 135 Гбайт в час. После сжатия около 0,7 Гбайт в час.
Телевидение высокой четкости.
1250 строк, 2 000 000 пикселей в кадре, в каждом 3 цвета, у каждого из них может быть 256 уровней яркости (3X8 бит = 3 байт), 25 кадров в секунду.
Поток информации 150 Мбайт в сек. = 540 Гбайт в час. После сжатия около 3 Гбайт в час.
ПАМЯТЬ
жесткий диск 20-500 Гбайт
CD 800 Мбайт
DVD одна сторона 4,8 Гбайт
микросхемы памяти
64 Мбайт-8 Гбайт
кассеты
8 Мбайт-2 Гбайт
флэш
цветное фото
1 килобит=2^10 бит=1024 бит=
=1000 бит
1 байт=8 бит
килобайт, 1 кбайт=1024 байт=
=1000 байт
мегабайт, Мбайт=1 048 576 байт=
=1000 000=1 000 000 байт
гигабайт, Гбайт=1 073 741 824 байт=
1 000 000 000 байт=1 000 000 кбайт=
=1000 Мбайт

ВК-200. *К измерению времени, размеров или расстояний мы привыкаем с детства. Если скажут, например, что до станции нужно пройти пять километров, то сразу ясно, что это много, часа полтора-два идти. Сейчас мы постепенно привыкаем к измерению объёмов информации и скорости её передачи. Учимся в цифрах представлять себе, почему параллельная её передача по многопроводным линиям происходит намного быстрее, чем последовательная передача по однопроводной. И чем выше чёткость картинки, тем больше информации нужно передать для её воспроизведения. А отображение цвета тоже, разумеется, требует передачи дополнительной информации.*


электростанция
1кВ
110кВ
высоковольтные линии
110кВ
220В
110кВ
220В
110кВ
20кВ
220В
потребители
Электрическая мощность в равной степени зависит от напряжения U и от тока I. Этим пользуются в линиях дальней передачи электроэнергии - в линию направляют большую мощность при высоком напряжении и сравнительно малом токе, резко уменьшая тем самым потери в проводах. При передаче энергии потребителю, напряжение понижают.

Р-78. МАШИНА ДЛЯ ПРЕОДОЛЕНИЯ РАССТОЯНИИ. Именно трансформатор позволил электричеству проходить сотни и тысячи километров от электростанций, то есть от места, где электрическая энергия была создана, до потребителя, который эту энергию использует на производстве или дома. Исключительную роль скромного труженика трансформатора в этом великом деле легко понять. Достаточно вспомнить, что главная рабочая характеристика электричества, его мощность **P**, в равной степени зависит от двух величин — от напряжения **U** и от самого тока **I**. Получив возможность выбора, мы для линий дальней передачи, конечно же, выберем вариант «Большое напряжение, малый ток». Потому что именно ток препятствует дальнему распространению

электричества, это он (упрощённая картина) сталкивается с атомами проводника, по которому движется, и на больших расстояниях из-за этих столкновений теряет значительную часть своей энергии. А осуществить выбор «Большое напряжение, малый ток», оказывается, очень просто, нужны для этого всего лишь два мощных трансформатора. Перед отправкой электрической энергии в дальний путь один повышающий трансформатор во много раз увеличит напряжение. При этом во столько же раз автоматически уменьшится ток — трансформатор мощности не меняет. А на другом конце линии дальней передачи примерно такой же трансформатор снизит напряжение до принятой стандартом безопасной величины

Т-170. **Настоящий генератор: штрихи к портрету**. От рамки, которая вращалась в магнитном поле, до настоящего электрогенератора так же далеко, как от зажигалки до ракетного двигателя, который выводит на орбиту многотонный спутник. Начнём с того, что на выходе типичного мощного генератора э.д.с. составляет несколько тысяч вольт, на одном виточке рамки такую электродвижущую силу не наведёшь. В настоящем генераторе она наводится в многовитковых катушках, как известно, э.д.с., наведённая в отдельных витках катушки, суммируется. Далее, катушки, в которых наводится э.д.с., не вращаются в поле постоянного магнита, как вращалась наша учебная рамка. В реальном генераторе катушки, в которых наводится э.д.с., входят в неподвижную его часть — в статор. А сам магнит, точнее электромагнит, находится в роторе, он вращается внутри системы этих неподвижных катушек, внутри статора. В обоих вариантах (вращается основная обмотка или вращается магнит) основная обмотка и магнитное поле встречаются в движении, так что в принципе разницы никакой нет, а вот выигрыш во втором варианте очень большой. Выходное напряжение генератора немалое, выходная мощность — сотни тысяч киловатт, снять такую большую мощность с помощью скользящих контактов очень непросто. А вот подвести ток к катушке вращающегося электромагнита — значительно проще.

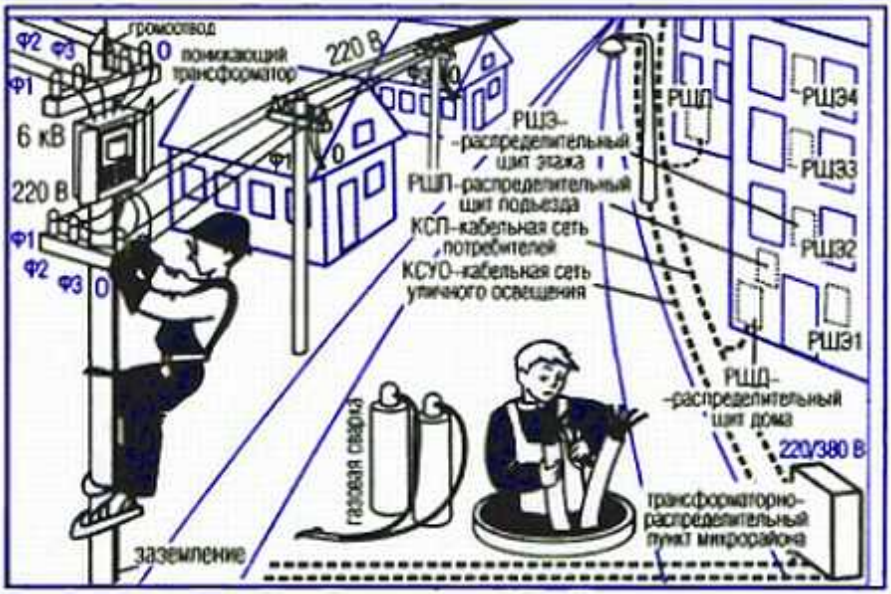
Ещё одна примета настоящей электрической машины. В ней главный работник — магнитный поток, который должен быть как можно более сильным. Поэтому поток, как в сердечнике трансформатора, в основном замыкается через железо — статор собран из стальных пластин, и ротор тоже стальной, но не

пластинчатый. Магнитное поле этого электромагнита вращается вместе со своим сердечником и вихревых токов в нём не наводит. Зазор между статором и ротором минимальный, для этого обмотка ротора уложена в пазы, чтобы она не выступала, не заставляла увеличить зазор. Статор и ротор имеют каждый свою систему жидкостного охлаждения, позволяющую создавать генератор более высокой мощности.

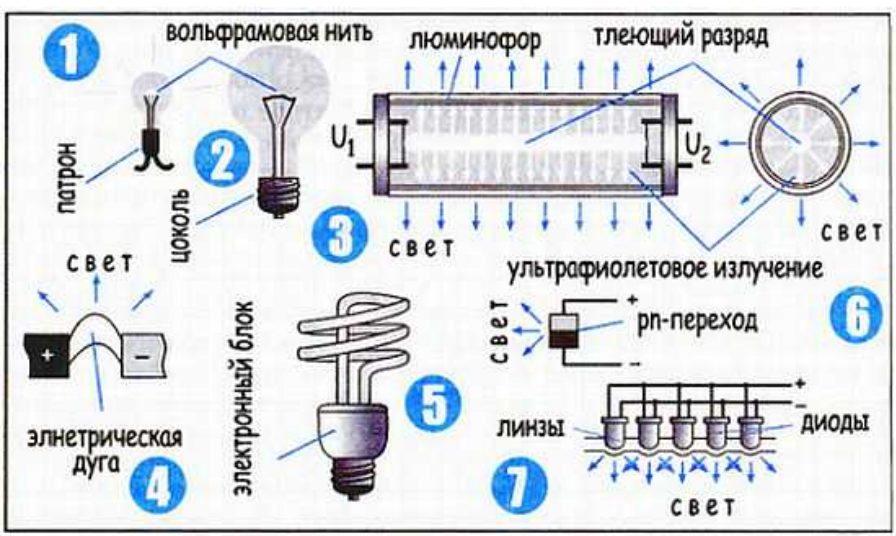
И ещё одна важная особенность: в настоящем генераторе очень часто не два магнитных полюса, а несколько пар полюсов. Как известно, во многих странах, в том числе и в России, для сетей переменного тока принята частота 50 герц, то есть 50 периодов в секунду или 3000 периодов в минуту. Чтобы получить такую частоту в двухполюсном генераторе, его ротор должен совершать 3000 оборотов в минуту, а это многовато — в больших машинах из-за больших центробежных сил возникают серьёзные проблемы прочности, да и некоторым первичным двигателям удобнее (Т-8) вращаться медленнее. Если в генераторе две пары магнитных полюсов, то на каждый оборот ротора приходится 2 периода переменного тока, и частота 50 герц получается уже не при 3000, а при 1500 оборотах в минуту. Чтобы получить 50 герц при трёх парах полюсов, ротор должен вращаться со скоростью 1000 оборотов в минуту.

Кстати, электрическая машина, о которой идёт речь, — это синхронный генератор, напряжение на его выходе меняется синхронно с вращением ротора. Если при определённом его положении появляется, например, положительная амплитуда, то она всегда будет появляться, когда ротор проходит через эту точку. Понятие синхронности ещё пригодится нам, когда речь пойдёт о двигателях — синхронных и асинхронных.

Что стоит за цифрами, называющими мощность электрогенератора, легче представить себе, если вспомнить следующее: энергетики считают, что каждому городскому жителю в среднем нужна электрическая мощность 3 киловатта, каждому сельскому жителю 2 киловатта, для заводов и других производств счёт особый. Электрические генераторы для электростанций обычно имеют мощность от 100 до 500 тысяч киловатт, хотя уже есть сверхмощные генераторы на 1 миллион и даже на 1,2 миллиона киловатт. На электростанции всегда несколько генераторов, а сами станции объединяются в крупные системы, снабжающие электроэнергией огромные территории, сотни городов, тысячи предприятий.



ВК-201. *Свобода художника проявилась в том, что на одной картинке показаны две эпохи развития электрических сетей. Справа большие дома, электричество приходит к ним по подземному силовому кабелю через понижающий трансформатор. Слева воздушная линия на столбах, она снабжает электричеством небольшие поселковые дома, на столбах находятся и понижающие трансформаторы. В обеих сетях к трансформаторам приходит высокое напряжение, например 6000 В, потребитель получает 220 В.*



Р-79. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО, СОЗДАЮЩЕЕ СВЕТ. В довольно длинном списке изобретателей ламп для электрического освещения первым обычно называют англичанина Деларю — он создал первую экспериментальную лампочку с платиновой нитью в 1809 году. Кстати, за семь лет до этого русский электротехник академик В.В. Петров построил мощнейшую химическую батарею и с её помощью получил очень ярко светящуюся электрическую дугу. И всё же реальным началом электрического освещения считают 1879 год, когда Томас Эдисон передал промышленности отработанную им за несколько лет электрическую лампу, пригодную для серийного производства. Хотя в этой сфере немало было сделано другими до Эдисона, у этого человека и сегодня есть чему поучиться. Взявшись за какое-нибудь дело, он непременно доводил его до конца в полном объёме. Так, для своей лампочки он создал дожившие до наших дней патрон, цоколь (1,2) и выключатель, а также всю систему электропроводки, включая керамические ролики, на которых висят провода. Он много работал над снижением стоимости своей лампы и от цены 1 доллар пришёл к 24 центам.

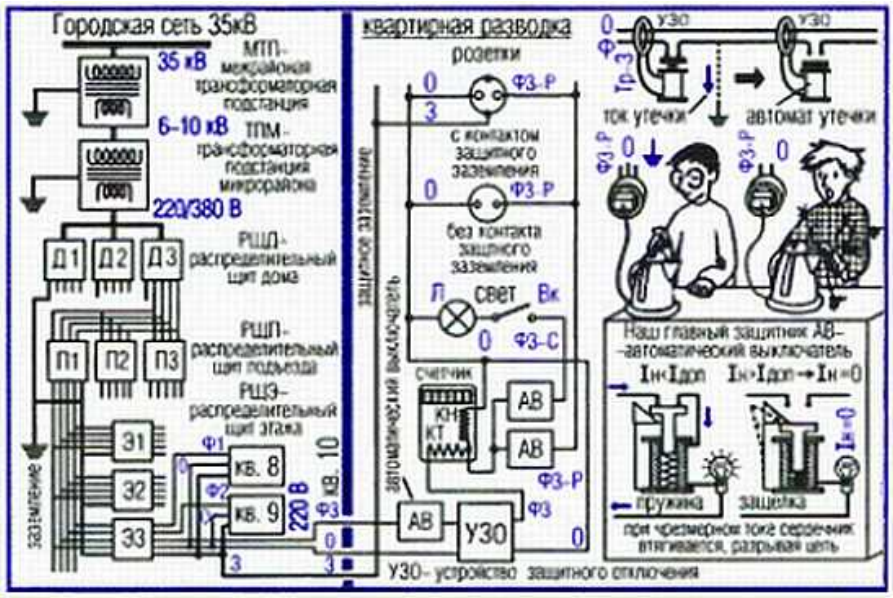
Не без него в 1882 году дело пришло к первым небольшим электростанциям, на основе которых развивалось электрическое освещение. В наши дни, пройдя множество усовершенствований (угольный стержень, например, уже давно и навсегда сменила вольфрамовая спираль) и несмотря на огромные потери электрической мощности (90–95 процентов) на излучение тепла, а также несмотря на то, что в некоторых странах производство простейших лампочек запрещено, эти лампы накаливания продолжают широко использоваться. Огромная часть электрического света в наше время приходится на трубчатые (3) и компактные (5) люминесцентные лампы, или, как их чаще называют, лампы дневного света. У них в центре создаётся слабый электрический разряд, дающий невидимое ультрафиолетовое излучение. Оно заставляет ярко светиться белый с виду люминофор, изнутри покрывающий стеклянную трубку. Уже начали широко применяться светильники на полупроводниковых светодиодах (6,7) — при прямом токе в их **pn**-переходе возникает сильное свечение, которое рассеивается в

нужном направлении пластмассовыми линзами.

Т-171. **Электрические машины — всё очень просто и непросто.** Генераторы уже несколько раз были названы машинами, и это их общепринятое имя. Причём электрическими машинами называют и генераторы, и двигатели, и даже трансформаторы, хотя никаких подвижных деталей в трансформаторах нет. У генераторов и двигателей много общего, и некоторые их виды — машины обратимые. То есть если вращать ротор обратимого двигателя, то на его обмотках появится э.д.с. и он будет работать как генератор. А если к обратимому генератору подвести внешнее напряжение, то его ротор начнёт вращаться, как у двигателя.

Здесь самый момент заметить, что короткое описание мощных генераторов не должно создавать иллюзию этакой абсолютной простоты электрических машин и полной свободы в их конструировании или использовании. Электрические машины — это сложные совершенные творения науки, техники и технологии, отработанные до мелочей, имеющие прочный теоретический фундамент и много очень интересных и важных особенностей. Подзаголовок этой книги «Несерьёзное предисловие к серьёзным учебникам» поясняет, что она, к сожалению, не может подробно рассказать по существу об электрических машинах и отсылает заинтересованного читателя к серьёзным учебным пособиям.

Но зато теперь, после сделанных предупреждений, мы можем, как было обещано, спокойно приступить к краткому общему знакомству с разными направлениями современной электроэнергетики. Реально действующих направлений у неё сегодня немало — здесь и прямое получение электричества при особом окислении топлива в топливных элементах, и разные способы использования солнечной энергии, и быстро набирающая силу ветроэнергетика, и особый вид генераторов с газообразными роторами, и многое другое, о чём ещё будет коротко рассказано в последнем разделе книги, посвящённом планам на будущее.



ВК-202. *Электрическая сеть приводит напряжение в квартиру потребителя довольно сложным путём. На этом пути есть разветвители и переключатели, есть трансформаторы, совместно снижающие напряжение в 100 раз и более. В сети немало автоматов, отключающих линию, если в ней недопустимо возрос ток. В каждую квартиру приходит одна из фаз и общий провод, здесь свой счётчик полученной энергии и свои средства защиты, в том числе реагирующие на прикосновение к токонесущей поверхности (ток утечки).*

Р-80. КАК УМЕНЬШИТЬ ДИАМЕТР ПРОВОЛОКИ, НЕ ПРИКАСАЯСЬ К НЕЙ. Если двумя кусками медного провода подключить лампочку к батарейке, а затем с

помощью какого-нибудь фантастического прибора заглянуть внутрь одного из проводов, то мы увидим, что по всей его толщине движутся электроны. Но на высоких частотах, например в сотни килогерц и более, картина заметно меняется. В центральной части провода разные составляющие поля противодействуют друг другу и ток идёт в основном только по окраинам, по кольцу, прилегающему к поверхности проводника (1). Это явление называется «поверхностный эффект», или по-английски «скин-эффект», то есть «эффект кожи». При диаметре медного провода 1 мм и частоте переменного тока 2 МГц площадь кольца, по которому идёт ток, составит всего лишь 2 % площади поперечного сечения провода. С увеличением частоты площадь круга, по которому идёт ток, уменьшается, то есть скин-эффект проявляется сильнее. Иногда для тока с частотой несколько мегагерц можно увидеть катушку индуктивности из нескольких витков медного провода, покрытого тонким слоем дорогого серебра с меньшим, чем у меди, сопротивлением. Делать весь провод серебряным нет никакого смысла, так как ток на этих частотах идёт только по самой его поверхности. Нередко используют многожильный провод с изолированными жилками, который называют «лицендрат» (2). У него соотношение между суммарным поверхностным слоем и общим сечением проводов лучше, чем у одножильного провода. При сборке концы всех жилок лицендрата соединяют, то есть включают их параллельно. Изучение и практическое использование поверхностного эффекта оказалось очень важным для индустрии. Закаливая сталь высокочастотным током, получают детали.

Т-172. **Команда «Турбина» уверенно выигрывает у команды «Поршень».** Начав с попытки пошутить, автор хотел бы рассказать об очень серьёзных событиях, имевших место 100 лет назад. Правда, если взглянуть повнимательней, то окажется, что всё началось почти на 2 тысячи лет раньше, когда замечательный греческий исследователь и инженер Герон Александрийский придумал свой эолипил (Р-84.1). Это был шар, который вращался под действием вырывавшегося из двух трубок пара, — первая, видимо, в истории попытка использовать тепло для выполнения механической работы. Уже приручил человек себе в помощь животных, уже заставил ветер и падающую воду вращать тяжёлые

жернова мельницы, а вот огненное вещество, которого полно было в любом лесу, хоть и не раз показывало свою грозную силу, а из полезных дел применялось только для того, чтобы изжарить кусок мяса или зимой погреться у костра.

Героновский эолипил долго оставался красивым опытом и при этом не более чем игрушкой — лишь более чем через полторы тысячи лет началась машинная биография огня. В качестве главного работника выбрали пар — даже в кипящем чайнике пар имел заметное давления и, вырываясь из носика, вполне мог бы выполнить небольшую полезную работу. Сначала был сконструирован специальный «большой чайник» — безопасный паровой котёл, затем английский кузнец Томас Ньюкомен с помощниками в 1705 году придумал паровой насос для откачки воды из шахт (Р-84.2), и, наконец, в 1781 году английский изобретатель и исследователь Джеймс Уатт (иногда по-русски его фамилия пишется как Ватт, этим именем названа единица мощности ватт) запатентовал свою «огневую машину». В ней пар высокого давления быстро двигал туда-обратно поршень в цилиндре, а это движение несложный механизм превращал во вращение рабочего колеса (Р-85). Джеймс Уатт изобрёл и самолично построил двигатель, который мог выполнять нужную работу, работал в двигателе горячий водяной пар, энергию на всё это давало тепло.

Изобретатель настойчиво совершенствовал свою машину, и вскоре она стала универсальным паровым двигателем самого широкого применения — от привода токарного станка до паровоза. И естественно, когда понадобился привод для электрогенераторов, то уаттовский поршневой паровой двигатель сразу же и, как казалось, навсегда получил эту должность. Началось с первого реально работающего электрогенератора «Альянс», который в 1857 году был создан для питания мощных ламп на маяках и работал вместе с небольшой паровой машиной мощностью 10 лошадиных сил (7,36 кВт). За несколько лет построили больше сотни таких установок, и вообще электрогенераторы (их мощность достигала сотен киловатт) с поршневым паровым двигателем стали основным поставщиком электроэнергии, лишь изредка уступая приводу, использующему энергию падающей воды.

Но прошло несколько десятилетий, и из многих областей техники уаттовскую паровую машину, это великое творение эпохи, начал уверенно вытеснять другой вид парового двигателя — паровая турбина (от латинского «турбо» — «быстрое вращение, вихрь»). Работу турбины пояснит выключенный из электросети вентилятор, установленный в потоке воздуха, например в

открытом окне. Лопасти закреплены на оси с небольшим поворотом, и благодаря этому ударяющий в них ветер создаёт вращательное движение вентилятора. Ту же роль играют сложной формы рабочие лопатки турбины, которые закреплены в её рабочих колёсах и расположены на пути мощной струи пара (Р-86). Сейчас в большинстве случаев мощную турбину и генератор считают единым комплексом, называют одним словом турбогенератор, их вместе рассчитывают при проектировании установки.

Примерно 100 лет назад паровая турбина подтвердила свои достоинства и с тех пор стала главным приводом мощных электрогенераторов на электростанциях. А ещё через несколько десятилетий электростанции стали получать ещё одного могучего помощника — газовые турбины, в которых рабочие колёса с лопатками разных размеров приводил в движение не пар, а газ высокого давления, появлявшийся при сжигании в камере сгорания топлива, например, керосина, угольной пыли или природного газа (Р-86).

ВК-203. *Статистики часто публикуют интересные (не всегда, правда, совпадающие) таблицы с данными о развитии электроэнергетики в разных странах и регионах. Из таблиц видно, что Россия немало производит электроэнергии, но пока ещё не очень хорошо её использует. Энергетика, конечно, развивается и растёт, но, как дело дорогое и сложное, развивается не молниеносно. Так, основные цифры, приведённые на итоговой*

таблице (на чёрной доске), к 2012 году выросли в среднем на 10 %.

Р-81. СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ, НО ПОКА ЕЩЁ ДАЛЕКО НЕ БЕСПЛАТНАЯ. Сегодня мировая промышленность ежегодно использует примерно 16 миллионов тонн меди (кстати, треть её производят в Чили), а в недрах её мировые запасы оцениваются в миллиард тонн. Так что запасов хватит лет на 60, а за это время, смотришь, ещё что-нибудь придумают. Многие представляют, каким должно быть это «ещё что-нибудь», — это высокотемпературные сверхпроводники. За 100 лет, которые прошли с открытия сверхпроводимости, в этой области сделано многое. В 1957 году была отмечена Нобелевской премией БКШ теория сверхпроводимости, её название — это первые буквы фамилий авторов Д. Бардина, Л. Купера и Д. Шриффера. В 1950 году начали создавать сплавы, которые не разрушают сверхпроводимости при больших токах (1) и сильных магнитных полях. С 1980 года пытаются создать на основе керамики высокотемпературные сверхпроводники. Не нужно, однако, думать, что у этих материалов исчезает активное сопротивление при температурах +50 или +100 градусов Цельсия — это ещё впереди. Существуют две знаковые температуры: жидкого гелия около 4 К, то есть ниже минус 269 °С, и азотная около 77 К, то есть ниже минус 196 °С. Большинство сверхпроводников приобретают эти свои свойства при гелиевых

температурах (2), и только в сравнении с ними назвали высокотемпературными новые материалы, которые становятся сверхпроводниками при температуре жидкого азота. Но пока таких материалов нет для широкого применения и жидкий азот используют для предварительного охлаждения гелия (3). Это требует меньшей мощности от гелиевой холодильной машины, что в целом упрощает и удешевляет получение сверхпроводников.

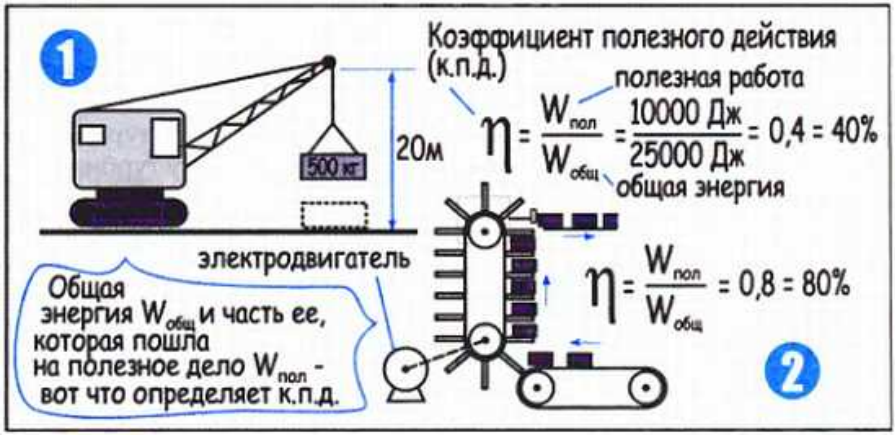
Т-173. **Рождённый летать, как оказалось, прекрасно справляется с чисто наземными делами.** Первые сведения о газовых турбинах к широкой публике начали приходить с развитием реактивной авиации. Через несколько лет после появления больших пассажирских «Ту» и «Илов» многие уже знали, что для реактивных самолётов и ракет бывает много разновидностей двигателей. Большинство из них для создания необходимой тяги использует выброшенную назад мощнейшую реактивную струю сожжённого газа, за что самолёты с такими двигателями во всём мире называют «джет» — «реактивный, выбрасывающий струю». В самом двигателе на пути газовой струи стоит сравнительно небольшая газовая турбина, которая отбирает некоторую часть мощности и использует её частично для нужд самого двигателя, а частично для вращения электрогенератора, питающего электричеством самолёт. Надо заметить, что на электропитание приборов, технических систем самолёта и создание определённых удобств для пассажиров (в частности, на полную смену воздуха 20–30 раз за каждый час полёта) требуется немалая электрическая мощность: в небольшом десятиместном самолёте — 20 киловатт, в большом пассажирском лайнере — 600 киловатт и более. При этом в кабельных линиях самолёта обычно циркулируют постоянное напряжение 27 вольт и переменное 200/120 вольт (указано линейное и фазовое напряжение)

А есть ещё так называемые турбовинтовые самолёты, в их двигателях почти вся энергия газовых потоков достаётся турбинам, которые создают необходимую тягу с помощью вращающихся пропеллеров («винтов»).

Пока ещё, видимо, не написана книга об истории появления на электростанциях газовых турбогенераторов, но, судя по всему, дело это не обошлось без мощных турбин, созданных для авиации. Они показали то, что специалистам было уже и так ясно: газовая турбина на тепловой электростанции очень нужна. Во-

первых, газовая турбина включается (и выключается!) буквально за одну-две минуты и, если нужно, может практически сразу же выдавать свою максимальную мощность. Это очень важно для того, чтобы покрывать нарастающие нагрузки именно тогда, когда они появляются, и не тратить топливо на долгую подготовку к этому событию всей системы питания паровой турбины. Во-вторых, не поработавшие в самой газовой турбине остатки газа направляют в топку парового котла, что в итоге повышает к.п.д. всей системы. И, наконец, третье: коэффициент полезного действия газового турбогенератора весьма неплохой, и, работая совместно с паровыми турбогенераторами, он доводит к.п.д. всей системы до 40–45 %, в то время как раньше на тепловых электростанциях с паровыми турбинами выше 32–34 % обычно не поднимались.

ВК-204. *Уже говорилось о порядке в наших взаимодействиях с электричеством (ВК-7 и далее). Сейчас, при постепенном переходе к заключительной части книги, скажем об этом ещё раз, начав с трагической и редко вспоминаемой цифры. Ежегодно в случайных, ошибочных, неожиданных столкновениях с электричеством в мире гибнет более 10 000 человек. Эта цифра была бы больше, если бы электроэнергетика не ввела своих строгих правил, неуважение которых есть первая причина высокой опасности.*


1
Коэффициент полезного действия (к.п.д.)
полезная работа
$\eta = \frac{W_{пол}}{W_{общ}} = \frac{10000\ Дж}{25000\ Дж} = 0,4 = 40\%$
общая энергия
500 кг
20м
электродвигатель
Общая энергия $W_{общ}$ и часть ее, которая пошла на полезное дело $W_{пол}$ - вот что определяет к.п.д.
$\eta = \frac{W_{пол}}{W_{общ}} = 0,8 = 80\%$
2

Р-82. ХАРАКТЕРИСТИКА, ИСКЛЮЧИТЕЛЬНО ВАЖНАЯ ДЛЯ ВСЕГО, ДЛЯ ВСЕХ И ДЛЯ КАЖДОГО. Эту характеристику обозначают греческой буквой «эта» — η и называют коэффициент полезного действия, сокращённо к.п.д., а иногда КПД. Смысл коэффициента достаточно просто поясняет само его название — он показывает, какую часть полученной энергии $\mathbf{W}_{общ}$ (иногда её называют затраченной или мощности. $\mathbf{P}_{общ}$ какая-либо машина использует для выполнения полезной работы $\mathbf{W}_{пол}$ или $\mathbf{P}_{пол}$ Коэффициент полезного действия указывают в процентах (например 90 или 70 процентов), или в долях единицы (например 0,9 или 0,7). При подсчете к.п.д. подъёмного крана (1) затраченную им мощность $\mathbf{P}_{общ}$ или энергию $\mathbf{W}_{общ}$ можно подсчитать, зная калорийность и количество топлива, потребляемого двигателем. А полезную мощность $\mathbf{P}_{пол}$ или энергию $\mathbf{W}_{пол}$ нетрудно найти, зная массу груза и высоту, на которую он был поднят. Аналогично к. п.д. небольшого конвейера с электрическим двигателем (2) можно оценить, если для начала амперметром и вольтметром измерить ток **I** и напряжение **U** и подсчитать мощность $\mathbf{P}_{общ}$, потребляемую двигателем ($\mathbf{P = U \cdot I}$). Затем можно определить массу, высоту подъёма и скорость следования изделий, перемещаемых конвейером, это позволит прикинуть — полезную мощность $P_{пол}$ и сам к.п.д. Коэффициент полезного действия — важная характеристика многих машин, часто решающая судьбу конкурирующих моделей и технологий. Но в то же время у этого коэффициента есть ещё, так сказать, философский смысл, он помогает оценить работающего

человека, его умение спланировать своё время, силы, опыт, чтобы получить не слова, пожелания и жалобы, а полезный, нужный людям результат. Это относится также к коллективам работающих людей — к маленьким артелям и крупным предприятиям, к далеким поселкам, к большим городам и целым странам.

Т-174. **Гравитационные силы работают бесплатно, но платить всё же приходится**. Человек, не просто проходивший в школе физику, но и кое-что усвоивший от общения с ней, вполне может возмутиться, услышав про якобы надвигающийся на человечество энергетический голод: «Кончается нефть? Ничего страшного, в природе полно бесплатной энергии — бери сколько надо! Одни только российские ветры в год приносят 10 триллионов киловатт-часов, в тысячи раз больше, чем нужно всем нашим электростанциям для переработки в электричество. Таких источников десятки, а в запасе еще есть $\mathbf{E = m \cdot c^2}$ — если бы мы научились полностью превращать массу в энергию, то из одного грамма получали бы 25 миллионов киловатт-часов энергии. То есть энергии, полученной из этого одного грамма массы, хватит на то, чтобы 100 лет снабжать электричеством большой стоквартирный дом.

ВК-205. *Человек со временем умнеет, и этому можно только радоваться. Но какая-то бессмысленная и опасная удаль всё же*

остаётся в характере и иногда недопустимо проявляет себя. В том числе в безопасных на первый взгляд отношениях с электрическим током. Там, где должна быть необходимая современному человеку уважительность в его отношениях с техникой, мы (давайте в этом признаемся и повинимся) почему-то начинаем важничать и унижать её, демонстрируя глупую и никому не нужную смелость.

1
2
3
4
90°
45°
30°
15°
0°
линия косинуса
45° cos φ = 0,7
30° cos φ = 0,87
15° cos φ = 0,97
0° cos φ = 1
$R_{ВН}$ $R_Н$ $P_{общ}$ $P_{пол}$ X_{L1}
$P_{пол} = P_{общ} \cdot 0,7$
$R_{ВН}$ $R_Н$ $P_{общ}$ $P_{пол}$ X_{L2}
$P_{пол} = P_{общ} \cdot 0,87$
$R_{ВН}$ $R_Н$ $P_{общ}$ $P_{пол}$ X_{L3}
$P_{пол} = P_{общ} \cdot 0,9$
Характеристика «косинус фи» (cosφ) или иначе коэффициент мощности, показывает, какая часть общей потребляемой мощности $P_{общ}$ используется в этой цепи на полезную работу $P_{пол}$

Р-83. КОЭФФИЦИЕНТ «КОСИНУС ФИ» ТОЖЕ ГОВОРИТ О ПОТЕРЯХ И ОТВЕЧАЕТ НА ВОПРОС «ЧТО ДЕЛАТЬ?» Этот показатель (cos **φ** имеет ещё одно название «коэффициент мощности» и говорит о потерях в отдельном двигателе или у целого завода. Во многих видах нагрузки можно увидеть два вида сопротивлений — это активное сопротивление **R** и индуктивное сопротивление $\mathbf{X_L}$ катушек, которые всегда есть в двигателях и трансформаторах. При этом **R** — это не только сопротивление обмоток и соединительных линий, это главным образом отображение работы, которую выполняет двигатель, и полезная нагрузка во вторичной обмотке трансформатора. Что же касается $\mathbf{X_L}$, то оно, как всякое реактивное сопротивление, мощности не потребляет. Но энергия, которую получает и отдаёт катушка, проходит через $\mathbf{R_{внт}}$ и безвозвратно что-то в нём теряет. Эти потери и отображает косинус угла **φ** (1), который в конечном итоге определяется токами через **R** и $\mathbf{X_L}$ — чем меньше ток через $\mathbf{X_L}$, тем выше косинус фи (cos **φ**) и меньше до обидного бессмысленные потери в нагрузке из-за индуктивности обмоток (2, 3, 4). Для повышения коэффициента мощности (косинуса фи) увеличивают время полезной работы двигателей и трансформаторов, а также подключают к ним

конденсаторы. У них, как известно, реактивный ток по отношению к индуктивному сдвинут по фазе на 180°, и конденсаторы поэтому могут уменьшить суммарный реактивный ток и связанные с ним потери.

Кто знает, может быть, эти фантастические пока надежды через несколько десятилетий станут работающей реальностью, подумайте о нынешнем немыслимо быстром продвижение вперёд науки и технологий. Ещё каких-то полторы сотни лет назад впервые было обнаружено, что в куске проволоки, который движется в магнитном поле, наводится электрический ток, а сегодня тысячи мощных электростанций, используя это открытие, снабжают мир электричеством — сколько надо, столько бери. Но пока ещё далеко не полностью мы используем другие доставшиеся нам источники энергии, тоже практически бесплатные.

Возьмём, к примеру, огромную работу, которую само по себе просто впустую выполняет притяжение Земли (гравитация), создавая реки и перемещая «сверху вниз» в моря и океаны миллиарды тонн воды. Она берётся с подтаивающих снеговых шапок на горных вершинах или из грозовых туч и тянется вниз, как яблоко, падающее с ветки, или выпущенный из рук камешек. Несколько тысяч лет назад мастеровые люди сообразили, что текущая в реке вода может и полезное дело делать, например, вращать тяжёлые гранитные жернова мельницы. Это изобретение и можно, видимо, считать началом гидродинамики, которая сегодня, например, вырабатывает более 17 % всей электроэнергии, производимой в нашей стране. А в таких гористых и в то же время индустриально развитых странах, как Швейцария или Норвегия, доля гидродинамики заметно больше — около 80 %. И всё это, не забудьте, без затраты топлива.

В наше время отбор энергии у движущейся воды осуществляют гидротурбины, мощные, как правило, агрегаты, чем-то напоминающие паровую турбину и так же жёстко связанные с ротором электрогенератора (Р-91). С учётом регулярного контроля за состоянием турбин, генераторов и другого оборудования ГЭС (гидроэлектростанций), с возможностью его замены либо ремонта, можно считать, что эти станции работают десятки и сотни лет. Любители эффектных вычислений, зная мощность ГЭС, могут при желании подсчитать сэкономленную ею нефть, уголь или иное топливо хотя бы за 10 лет — совершенно ясно, что цифра получится ошеломляющая.

Не нужно, однако, думать о полной бесплатности

электричества, получаемого от гидроэлектростанций. Во-первых, на станции работают люди, им нужно платить зарплату, создавать нормальные условия для жизни семьи, в частности, строить жилые дома, школы, находить учителей. Ну а главное, проектирование и строительство гидроэлектростанции — дело сложное и дорогое. Для работы турбогенераторов и получения от них большой мощности необходимо высокое давление воды, а для этого в выбранном месте реки строят высокую и очень прочную плотину. Плотина фактически перегораживает реку, не даёт прибывающей из горных районов воде сразу же продолжать свой путь к морю-океану. Чаще всего высота бетонно-каменной плотины около 90 метров, и за ней, естественно, поднятая плотиной вода затопила огромные территории и образовала целое море, как его называют — «водохранилище». Чаще всего в плотину в нижней её части вмонтированы машинные залы, и в них электрогенераторы, турбины и мощные трубопроводы, которые подводят к ним воду с самого верха, с верхней отметки, до которой поднята вода (верхний бьеф). Вода, стартовавшая высоко наверху, проходит внизу через турбины и, отдав электрическим генераторам свою энергию, выходит на свой нижний уровень (нижний бьеф), с которого она продолжит свой обычный путь к морю или к океану. Чтобы читатель легче представил себе, что может стоять за этим коротким рассказом о гидроэлектростанции, приведём несколько цифр и фактов касательно новой мощной станции на реке Ангаре — Богучанской ГЭС (иногда для краткости её называют БоГЭС.

ВК-206. *Этот рисунок напоминает нам о союзе химии и науки об электричестве. Он мог бы появиться в самом начале книги, так как этот союз есть исключительно важная, можно сказать, великая истина, определяющая наши знания о мире, в котором мы живём. Достаточно вспомнить, что электричество есть одна из основ устойчивости атомов и сила, собирающая их в молекулы, из которых состоят все вещества. Химия не может жить без электричества, но и его величие во многом связано с успехами химии.*

1
2
П1
ПАР
П2
атмосферное давление
ВОДА
Идея паровой турбины Герона Александрийского лишь через 2 тысячи лет превратилась в настоящую мощную машину.
Машина Томаса Ньюкомена затрачивая энергию пара (поршень П1) приводила в движение насос (поршень П2), откачивающий воду из шахты.

Р-84. ЭНЕРГИЯ ТЕПЛА — ПЕРВЫЕ ШАГИ ГИГАНТА. Когда-нибудь об этом всё же нужно подумать — люди получают немалую реальную помощь от созданных ими машин и сооружений. Огромные подъёмные краны, 750 миллионов автомобилей, бессчётные заводы и сельскохозяйственные фермы, поезда метро, электронные схемы из двух миллиардов деталей в маленьких, с почтовую марку, чёрных корпусах, океанские лайнеры, благоустроенные квартиры с освещением, водопроводом и центральным отоплением, симфонический оркестр и лучшие голоса мира на небольшом пластмассовом диске, сотни тысяч больших самолётов. Даже не верится, что ещё пару тысяч лет назад человек имел лишь то, что мог добыть силой своих мускулов.

Энергию для нынешнего нашего индустриального могущества в основном получают от тепловых процессов,

сжигая для этого ископаемое топливо — нефть, уголь, газ. Использованием этого топлива машинами, превращающими тепло в полезную работу, начали серьёзно заниматься лет триста назад. Во всяком случае первая опубликованная идея паровой машины (1) жившего в Египте греческого математика, инженера и изобретателя Герона Александрийского прождала почти две тысячи лет, чтобы превратиться в мощный тепловой двигатель — в паровую турбину. Она, кстати, уже много десятилетий работает на всех крупных тепловых электростанциях, вращает роторы больших электрогенераторов и участвует в производстве примерно 70 процентов мировой электроэнергии.

Первую работающую паровую машину после десяти лет поисков, переделок, налаживания и проверок построил в 1712 году английский кузнец Томас Ньюкомен при помощи своего друга водопроводчика Джона Коули. В главном паровом насосе давление пара поднимало поршень П1 вверх (2). Затем доступ пара в цилиндр насоса перекрывали, остатки пара конденсировались и в цилиндре оказывалось пониженное давление, как иногда говорят, частичный вакуум. При этом атмосферное давление с силой передвигало поршень П1 вниз (3), и этой силы вполне хватало, чтобы через рычаги переместить вверх поршень П2 водяного насоса и откачать снизу вверх заметную порцию воды. Через некоторое время, познакомившись с реальной работой ньюкоменовского насоса, его стали активно закупать и с его помощью даже ввели в строй ранее затопленные шахты. Но главное, этот насос был первой реально работающей паровой машиной, его создатель не просто высказал соображения в пользу пара, но и показал всем, что пар может работать.

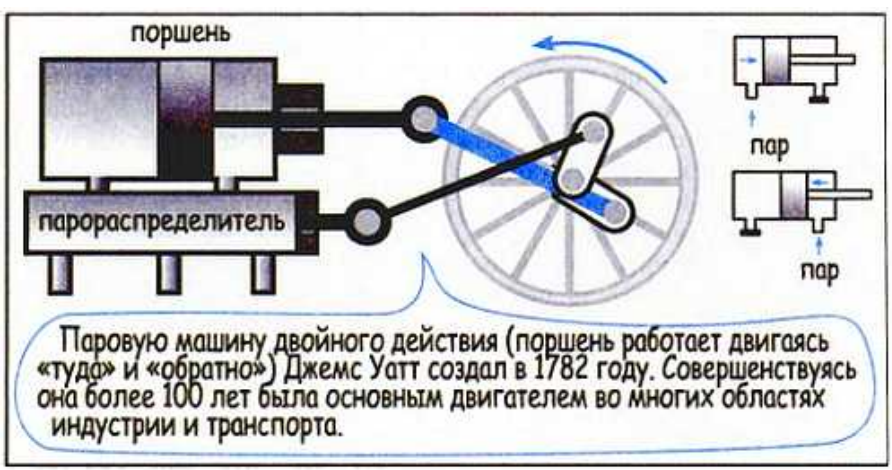
Богучанскую гидроэлектростанцию (БоГЭС) начали строить в 1980 году (подготовительные работы велись с 1978 года) на расстоянии 444 километра от устья реки — впадения Ангары в Енисей, который уходит в Северный Ледовитый океан. БоГЭС строилась на расстоянии 367 километров от уже построенной в 1979 году выше по Ангаре Усть-Илимской ГЭС, близкой к БоГЭС по многим показателям. Первоначально станция БоГЭС должна была иметь среднюю мощность 4 миллиарда МВт (мегаватт), но в дальнейшем проект был скорректирован, и мощность станции

будет 3 миллиарда МВт — этого достаточно, чтобы накормить электричеством несколько таких городов, как Тамбов. Среднегодовое производство энергии примерно 18 миллиардов киловатт-часов. Для станции построена железобетонная плотина высотой 87 метров (у Усть-Илимской ГЭС — 105 метров, длина бетонной части плотины около 1,5 километра), вода по огромным трубопроводам поступает в гидротурбины с высоты 67 метров (верхний бьеф). Всего имеется девять таких трубопроводов по числу гидротурбин с электрогенераторами. Создание плотины и подъём воды за ней привели к затоплению больших обитаемых регионов и, естественно, к переселению людей, за плотиной образовалось водохранилище площадью 2326 квадратных километров.

Финансисты подсчитали, что полная стоимость строительства БоГЭС составит примерно 75 миллиардов рублей, из них меньше 5 % согласно контракту заплачено Акционерному обществу «Силовые машины» за разработку и изготовление главных агрегатов станции — девяти гидротурбин с электрогенераторами. Эти агрегаты, кстати, были доставлены в район строительства в основном водным путём через Белое море и Северный Ледовитый океан на специально приспособленном для такого груза судне. Огромные средства ушли на земляные работы, на строительство нового моста через Ангару, обустройство территории предполагаемого затопления, сооружение плотины и шлюзов системы судоходства, обустройство машинного зала и девяти водоводов с уровня верхнего бьефа вниз к девяти гидротурбинам. Кстати, при сооружении девяти таких систем было смонтировано 4330 тонн металлоконструкций и 1700 тонн деталей арматурного каркаса.

И всё же, когда ГЭС начинает работать, большие кредиты, взятые на её строительство, постепенно возвращаются — пользователи всё же платят за энергию, получаемую от станции. Энергия эта оказывается дешёвой, но не бесплатной.

ВК-207. *Связь электрических и химических процессов особо важна в живом организме. Так, некоторые рыбы используют полученное в биологических процессах электрическое напряжение 250 вольт для защиты и нападения. По нервным волокнам движутся электрохимические сигналы, несущие различную информацию. С электричеством и химией связаны многие процессы в живой клетке, обеспечивающие, например, пропуск в неё нужных веществ и создание электрических импульсов для связи и мышления.*


поршень
пар
пар
парораспределитель
Паровую машину двойного действия (поршень работает двигаясь «туда» и «обратно») Джемс Уатт создал в 1782 году. Совершенствуясь она более 100 лет была основным двигателем во многих областях индустрии и транспорта.

Р-85. ПАРОВАЯ МАШИНА ПРОИЗВОДИТ ЛЮБУЮ

РАБОТУ, ЕСЛИ ЕЁ МОЖНО НАЧАТЬ С ВРАЩЕНИЯ. Англичанин Джеймс Уатт сегодня, пожалуй, известен всем. Его именем названа единица измерения мощности ватт, многие знают, что это он 250 лет назад изобрёл паровую машину, с которой, как считают историки, на планете началась научная и техническая революция, так изменившая жизнь людей. Джеймс Уатт столь высоко отмечен потому, что он не отворачивался от ошибок, чужих и своих. Он добивался глубокого понимания используемых процессов и находил в итоге правильные решения. Этот стиль стал основой жизни людей, открывающих тайны природы и решающих сложные задачи техники. Так случилось, что начиная с 1763 года Уатт занимался усовершенствованием парового насоса Ньюкомена (Р-84). В 1776 году его новая машина была запатентована и построена, она оказалась в два раза эффективнее старой. Однако это было лишь поводом для размышлений, через шесть лет Уатт создал совершенно новый паровой двигатель двойного действия, где атмосферное давление вообще не использовалось. Только пар двигал поршень в цилиндре (диметр 63 см, длина 183 см) то в одну сторону, то в другую, и сама машина, как видно на рисунке, переключала направление парового потока. В те времена проблемы, особенно финансовые, были, видимо, не менее сложными, чем сейчас. И не случайно Джеймс Уатт серьёзно обдумывал российское приглашение на работу, где его ждёт «занятие, сообразное с его вкусом и знаниями» и годовая зарплата 1000 фунтов стерлингов. Однако в Россию он не поехал — вскоре на крупном лондонском пивоваренном заводе заработал новый уаттовский двигатель, который делал то, что раньше делали 24 лошади. Теперь все могли видеть, что такое надёжная и неприхотливая паровая машина. Это было началом быстрого внедрения паровых двигателей, придуманных Дж. Уаттом, во все практически отрасли индустрии — от пароходов и паровозов до мощных генераторов на электростанциях.

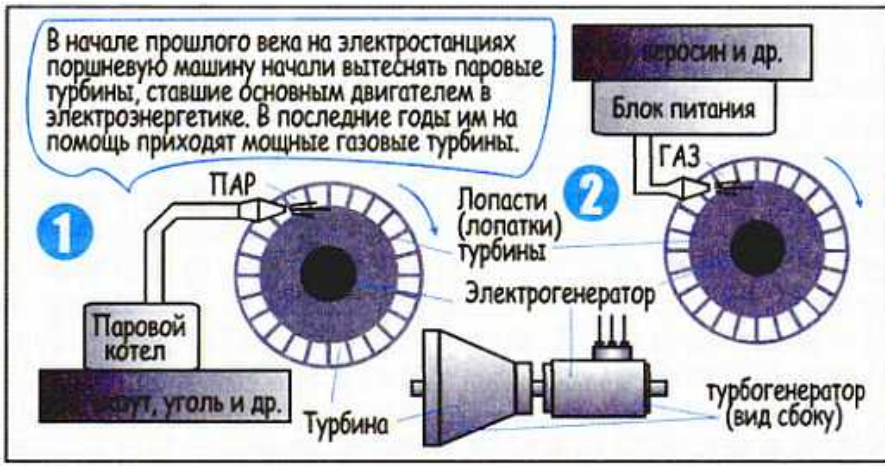
***Т-175.* Ядерная энергия создаёт электрическую энергию в основном с помощью старого проверенного мастера.** В недавнем 2010 году из всей произведённой в России электроэнергии 65 % пришлось на тепловые электростанции

(состыкованные с электрогенераторами мощные паровые турбины, а иногда и газовые), около 18 % на гидроэлектростанции (ГЭС) и примерно 17 % на атомные электростанции (АЭС). Такую пропорцию можно считать типичной для индустриальных стран, хотя, конечно, есть исключения и весьма заметные. Так, например, в Бельгии, Украине и Словакии доля АЭС в производстве электрической энергии около 50 %, во Франции более 70 %, а в Германии, где АЭС производят почти треть электроэнергии, решено в ближайшие годы вообще закрыть все атомные электростанции и новых не строить. И всё же три названных направления — тепловые, гидро- и атомные станции — можно считать основой производства электрической энергии в мире. О тепловых электростанциях и ГЭС уже было коротко рассказано, остаётся сказать несколько слов об атомной электроэнергетике.

Начнём с того, что к самому этому давнему названию «атомные электростанции» надо сделать два серьёзных примечания. Во-первых, отметим, что прав тот, кто те же станции называет не атомными, а ядерными. Потому что первичную энергию на них получают не из атомных процессов, в которых в основном участвуют электронные оболочки атомов. Первичную энергию на АЭС получают из ядерных процессов, из развала ядер некоторых специально подобранных элементов, в частности, из плутония или из одного из изотопов урана (уран-235, в его ядре 235 тяжёлых частиц — 92 протона, как всегда в уране, и 143 нейтрона). При распаде уранового ядра, например, на 2 ядра железа по 26 протонов в каждом плюс более мелкие осколки ядра и нейтроны, выделяется большая по атомным масштабам энергия. А появившиеся свободные нейтроны поддерживают процесс, разрушая другие ядра. Процессом этим можно управлять так, чтобы не развивалась и не усиливалась цепная реакция распадов (как в бомбе), а чтобы выделение энергии оставалось на безопасном уровне.

Второе примечание напоминает, что сама атомная (ядерная) установка, давшая имя всей электростанции, — это реактор, в котором происходит распад ядер и выделяется тепло. Его переносчики — частицы, появившиеся при распаде, они летят с большой скоростью и благодаря этому имеют немалую энергию. Ну а дальше следует то, что нам уже в общем виде знакомо: паровой котёл, паровая турбина, вращающая ротор электрогенератора. Так что АЭС — это, по сути, два самостоятельных ведомства: источник тепловой энергии атомный реактор и уже знакомая нам тепловая электростанция, умеющая превращать тепло в электрическую энергию.

ВК-208. *Человек строит разного рода модели, подробно отображая в них то, что в данный момент его занимает. Но особо важно, что своего рода копии этих моделей каким-то образом появляются в мозге. Думая о них, работая с ними, человек не только на бумажном листе, но и в своих мыслях занимается тем, что его волнует. Создание модели и возможность детального её обдумывания как раз и приводит к замечательным открытиям и к созданию предметов и процессов, ранее казавшихся невозможными. В начале прошлого века на электростанциях поршневую машину начали вытеснять паровые турбины, ставшие основным двигателем в электроэнергетике. В последние годы им на помощь приходят мощные газовые турбины.*



Р-86. ДВА-НОЛЬ В ПОЛЬЗУ ТУРБИНЫ. Паровые турбины начали создавать, в том числе и русские мастера, примерно в то же время, что и паровые двигатели. Современного типа турбины появились в конце позапрошлого века, в 1883 и в 1889 годах. Принцип их действия достаточно прост — струя пара ударяет по лопастям (лопаткам) турбины, закреплённым на её рабочем колесе. Под действием этих паровых ударов колесо быстро вращается вместе с осью, на которой оно закреплено, — турбина работает (1). Первая приведённая дата относится к появлению турбины шведского изобретателя Густафа Лаваля. В ней было одно рабочее колесо с лопатками и несколько пароподводящих трубок, пар, выходил из сопла каждой со скоростью около 800 метров в минуту, а в некоторых режимах со сверхзвуковой скоростью. Рабочее колесо при этом вращалось со скоростью до 30 тысяч оборотов в минуту. Вторая дата относится к тому, что английский инженер Чарлз Парсонс продемонстрировал 300 своих паровых турбин разной мощности, работающих с электрогенераторами. А еще через 11 лет большая электростанция, построенная в Германии, была полностью укомплектована мощными турбинами Парсонса. В каждой из них было несколько рабочих колёс, размер которых постепенно уменьшается. Пар, проходя через всю турбину от самого большого колеса к самому малому, отдавал лопаткам практически всю свою энергию. Турбины именно такого типа работают сегодня на электростанциях во всём мире.

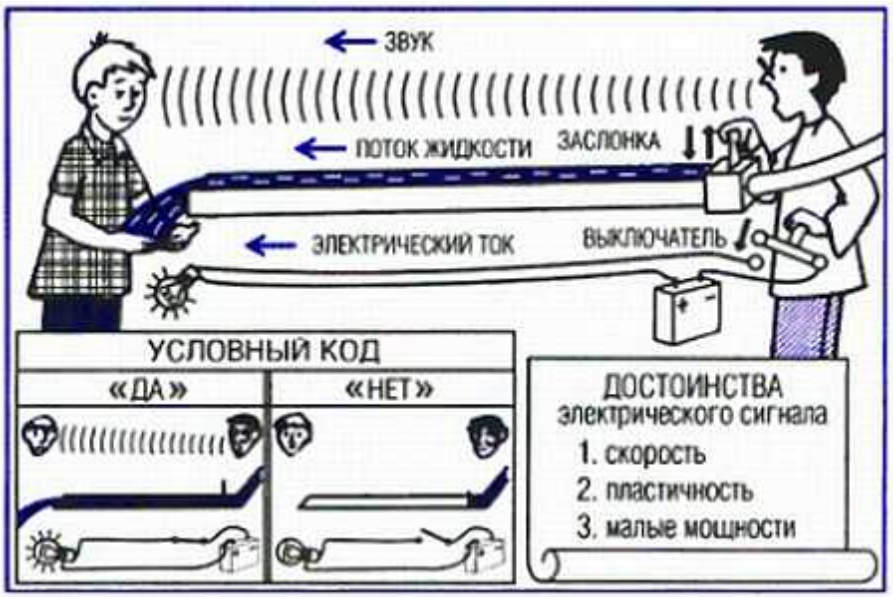
Несколько лет назад у паровых турбин появился умелый помощник — газовая турбина (2). В ней всё практически такое же, как и в паровой, но только лопатки на рабочих колёсах подталкивает не пар, а газ, появившийся при быстром сжигании топлива (как в автомобиле), например керосина или природного газа. Одно из особых достоинств газовой турбины — её, в отличие от тепловой, можно быстро запустить.

Когда появились первые электростанции, то ротор электрогенераторов вращали поршневые паровые машины, и считалось, что это хорошо. Сейчас на тепловых электростанциях работают паровые и газовые турбины, некоторые из них производители продают с гарантией на 100 000 часов непрерывной работы, а это как-никак более 11 лет.

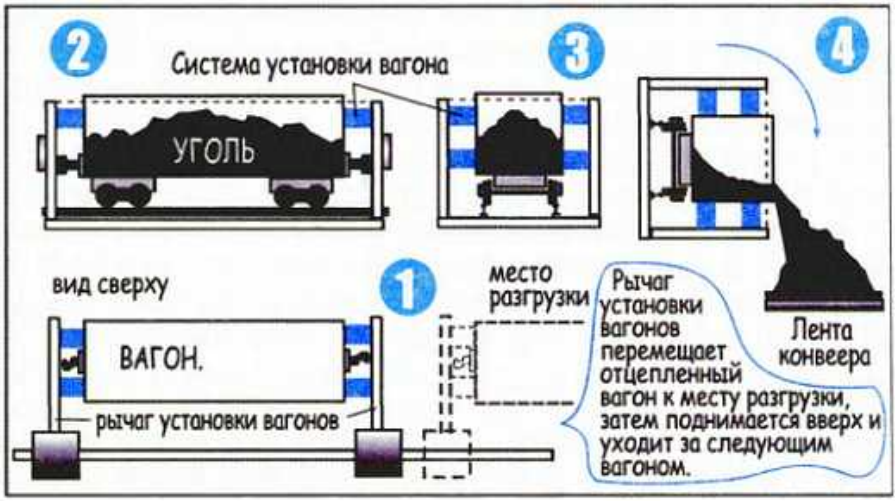
Т-176. **Отряд догоняющих — солнечная энергия, ветер, земное тепло, Луна.** Согласно статистике, 99 % всей электроэнергии в нашем мире производится на тепловых (ТЭС), гидро- (ГЭС) и атомных (АЭС) станциях. Как говорят сами названия этой тройки, электрическую энергию она создаёт за счёт сжигания различных видов топлива, за счёт энергии мощных потоков воды и за счёт процессов деления атомных ядер. Оставшийся 1 % приходится на долю, как их часто называют, альтернативных источников энергии (от латинского слова «альтер» — «совсем другого типа, нетрадиционный», в данном случае не такой, как основные поставщики электроэнергии). Сейчас мы коротко напомним о тех, альтернативных источниках энергии, которые стремятся догнать кого-нибудь из тройки основных производителей электричества.

Не пытаясь искать справедливую очерёдность, начнём с солнечного излучения (начнём с него и кончим им же — нечто особо важное и интересное о солнечных лучах будет сказано в конце этого раздела). Для нас, землян, солнечное излучение, как источник энергии, отличается тем, что о нём не нужно подробно рассказывать словами, достаточно привести одну цифру: если рядом с нашей планетой выделить перпендикулярную солнечным лучам площадку площадью 1 квадратный метр (например, квадрат со стороной 1 метр), то этому участку достанется мощность солнечного излучения 1,367 киловатта. Это довольно много, почти полтора киловатта, такой мощности достаточно, чтобы одновременно работали холодильник, телевизор, компьютер и ещё десяток довольно ярких электролампочек. Это

очень много, 1,367 киловатта, если учесть, что мы находимся довольно далеко от Солнца, расстояние между нами 150 миллионов километров. На самой Земле, разумеется, можно получить среднюю мощность солнечного излучения почти в 2–3 раза, а то и в 5-10 раз меньше солнечной постоянной. Во-первых, потому, что Земля — шар, который вращается вокруг собственной оси, и в среднем 12 часов в сутки световая мощность, попадающая на затенённую (ночную) территорию, практически равна нулю. Во-вторых, даже в полдень мощность, близкая к солнечной постоянной, достаётся лишь экваториальным районам, и при движении к полюсам она убывает, в какое-то время года до нуля. Ну и, в-третьих, атмосфера, в основном облаками и тучами, заметно снижает солнечную энергию, добравшуюся к Земле.



ВК-209. *Это было давно, но не очень: в 1837 году Морзе изобрёл свой телеграфный аппарат и через год придумал для него азбуку, применяемую поныне (азбука Морзе). А еще через 6 лет на этой основе начала работать первая американская линия электросвязи протяженностью несколько десятков километров. В те времена электричество ещё не очень было известно, и у него были явные конкуренты — звуковая и оптическая связь. Но выбор делали люди, сумевшие понять плюсы электричества, в том числе для связи.*

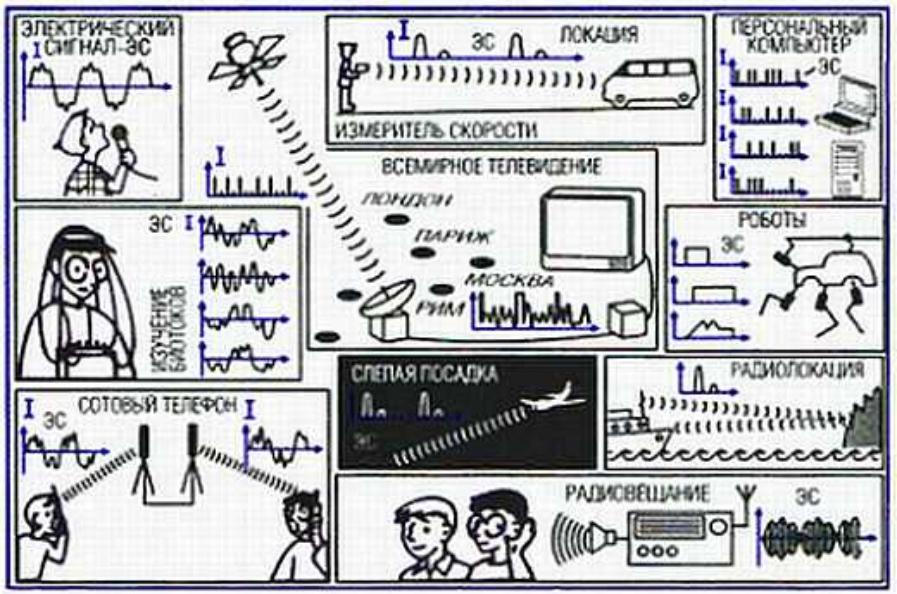


Р-87. РАЗГРУЗКА БЕЗ ГРУЗЧИКОВ. Согласно статистическим таблицам, российская энергетика вырабатывает 15 % электроэнергии на гидроэлектростанциях, почти столько же на атомных и основное количество, а именно 70 %, на тепловых станциях, которые производят электричество, сжигая органическое топливо — нефтепродукты, природный газ, уголь. Уже много лет идут разговоры о том, что подземные запасы этого топлива не безграничны. Первой заставляет тревожиться нефть, разведанных запасов которой при нынешнем потреблении 3,8 миллиарда тонн в год хватит на 40 лет. Причём за последние 35 лет потребление нефти выросло в 1,5 раза. Несколько лучше пока обстоит дело с природным газом, его разведанных запасов должно хватить на 100 лет. Ну а запасов угля может быть достаточно лет на 200, хотя иногда публикуют более крупные цифры и даже намного более крупные. В то же время за углём, в основном из прошлого, тянется какой-то чёрный шлейф, в который вплетены трудное и опасное добывание угля в глубоких шахтах, нередкие аварии на них, тяжкая и грязная работа людей с углём и шлаком там, где этот уголь сжигают. Можно только гордиться тем, что на наших электростанциях, работающих с углём, уже давно поняли, что на всех участках этого огромного производства должна работать современная техника, в основном оставляющая человеку функции контроля и управления. На рисунке схематично показана система

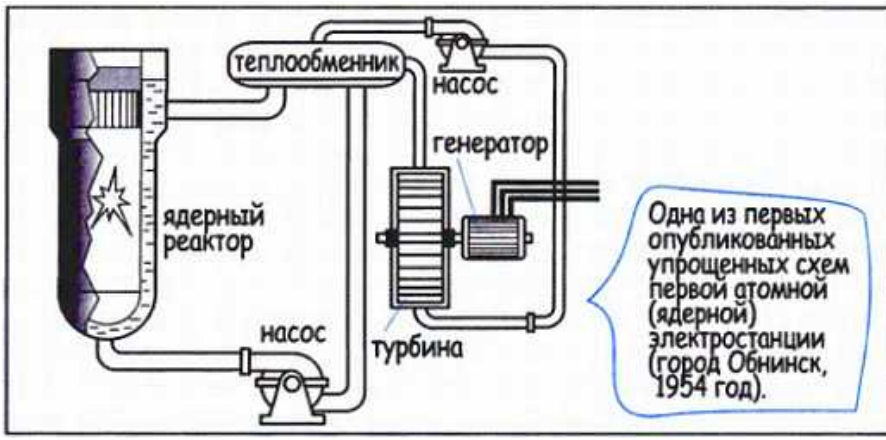
автоматической разгрузки вагонов с углём, уже давно применяемая на многих станциях. Вагон на короткое время выделяют из состава, с которым он прибыл, автоматы точно устанавливают его в поворотную раму (1) и закрепляют, затем рама поворачивается более чем на 90 градусов и весь уголь высыпается на ленту проходящего рядом транспортера (4). Посмотришь на сохранившиеся старые снимки, где замученные грязные работяги, в основном женщины, тащат к топкам корзины с углём или волокут на свалку корзины шлака, и ясно видишь, что на новые электростанции пришли не только новые машины и технологии, но и нечто более важное — человеческое отношение к человеку.

И всё же тяга к бесплатной энергии так сильна, что в экваториальной полосе шириной 500-1000 километров пытаются создавать опытные пока солнечные электростанции (СЭС), которые в среднем за год давали бы в электрическом виде 6–8 % солнечной постоянной, то есть примерно от 80 до 100 ватт с каждого квадратного метра светоприёмников, расположенных примерно на уровне земли. Одно из главных достоинств солнечной электроэнергетики в том, что в качестве светоприёмников она может использовать фотоэлементы, которые сразу превращают световую энергию в электрическую. Сегодня у серийных кремниевых фотоэлементов к.п.д. примерно 30 %, то есть, получив 100 ватт световой мощности, они выдают постоянный ток мощностью до 30 ватт, остальные 70 ватт в основном превращаются в ненужное в данном случае тепло. Если учесть все виды потерь (из-за ночной темноты, утреннего и вечернего снижения освещённости и, наконец, в самом фотоэлементе), то окажется, что на земле с квадратного метра покрытой фотоэлементами поверхности можно в лучшем случае получить 80-100 ватт электроэнергии, о которых уже говорилось. То есть чтобы получить мощность, близкую к той, что даст Богучанская ГЭС (Т-174), нужно иметь покрытую фотоэлементами площадь не меньше, чем 30 квадратных километров, например, прямоугольник размером 5х6 километров. Это во много раз меньше, чем дополнительно было забрано территории для водохранилища Богучанской станции, но это «во много раз меньше» всех проблем солнечной энергетики никак не решает. От фотоэлементов мы получаем постоянный (одного направления) ток, а нам нужен переменный ток с частотой 50 герц, чтобы солнечную электростанцию можно было включить в общую

электросеть, от которой кормится вся страна. Выполнить необходимое преобразование постоянного тока в переменный при большой мощности — задача непростая. А тут ещё огромная площадь фотоэлементов, которые, во-первых, пока ещё очень дороги и, во-вторых, их чуть ли не целый день нужно чистить и мыть — панели фотоэлементов довольно быстро покрываются пылью, резко ухудшающей их светочувствительность, а значит, и к.п.д. Ну а кроме того, солнечная электростанция основную свою энергию даёт ближайшим соседям в такое время, когда она не очень-то нужна — пик нагрузки наблюдается утром, когда народ отправляется на работу, и вечером, когда люди возвращаются домой. В это время станция получает мало солнечной энергии или не получает её совсем. Это значит, что на станции должен быть мощный накопитель энергии, например в виде сверхмощной аккумуляторной батареи огромной ёмкости.



ВК-210. *Чтобы рассказать о современном применении электроники, нужна книга побольше этой. Представлять себе такое применение начали, видимо, после 1910 года, когда уже прижилась электронная лампа. Затем последовали ещё два серьёзных события, резко расширившие возможности электронных технологий. Это появление транзисторов, позволивших вместо электронной лампы использовать кремниевую песчинку. И это интегральная — блок из миллиона деталей размером с почтовую марку.*

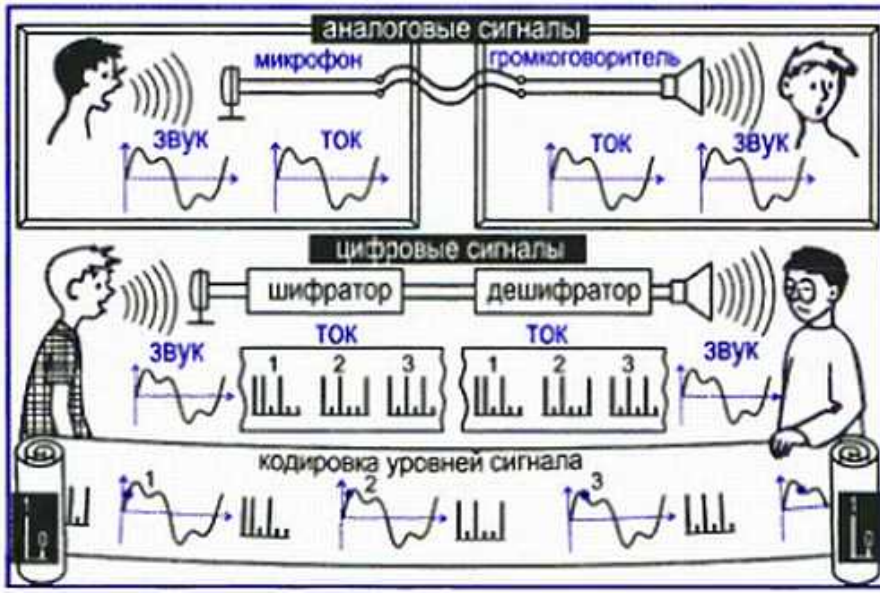


Р-88. ВСЁ ТО ЖЕ САМОЕ, НО ПЕЧКА СОВСЕМ ДРУГАЯ. Человеку, который впервые знакомится с атомной электростанцией, полезно знать, что часть её — это обычная тепловая электростанция, которую можно увидеть в сотнях других городов. Это паровой котёл и паровая турбина, ось которой (иногда её называют вал) жёстко соединена с осью (с валом) электрогенератора. А вторая часть атомной электростанции, к которой собственно и относится слово атомная, — это источник тепла. Он делает то же, что и паровой котёл с топкой, — снабжает паровую турбину паром. Но на атомной электростанции котёл есть, а топки нет, и тепло даёт не горение, а ядерные реакции. Две цифры могут проиллюстрировать один из результатов такой замены — чтобы получить 10 кубометров работающего пара, нужно сжечь 100 килограммов угля или использовать энергию, которая выделяется при распаде атомов 20 граммов урана.

В списке достоинств атомной электроэнергетики много серьёзных разделов. Реакторы, например, в отличие от тепловых станций, не делают вредных выбросов в атмосферу и не потребляют кислорода. Но есть список недостатков атомных электростанций, на первом месте в нём несовместимость некоторых элементов станции с существованием биологических объектов. На любой атомной станции сделано всё необходимое для защиты обслуживающего персонала и ведётся жесткий контроль за состоянием среды, где находятся люди. В частности, деление ядер происходит в надёжно отгороженном пространстве по имени реактор.

А основную часть тепла отбирают потоки теплоносителя (например, воды) первого контура, который с открытыми агрегатами станции не связан. Из него тепло «без касания» поступает во второй контур теплоносителя, и уже в нём создаётся пар, поступающий в паровую турбину.

Теперь должно быть понятно, почему рабочие проекты очень мощных электростанций, использующих бесплатную солнечную энергию, пока не созданы, хотя идеи в этой области существуют и активно обсуждаются. Пока реальными считают средние СЭС мощностью несколько мегаватт (несколько тысяч киловатт) для питания небольшого посёлка, например, курортного или туристического комплекса. Такие станции в порядке эксперимента построены и исследуются в Германии (восемь станций), Испании, США, Португалии, Израиле, Италии, Канаде и других странах. Примечательно, что в числе этих станций несколько башенных — установленные на земле десятки больших металлических зеркал-рефлекторов собирают солнечное излучение и направляют его на вершину башни, где находится светоприёмник. Часто это теплообменник парового котла, который по трубопроводу посылает пар вниз, на землю, в машинный зал, к серийной паровой турбине с электрогенератором привычного переменного тока. Особое внимание сейчас привлекают маломощные солнечные электростанции, в частности, мощностью от 1 до 20 ватт. Они могут использоваться для электропитания небольшого личного дома или нескольких таких домов. Ввиду сравнительно небольшой мощности станции для неё легко сделать аккумуляторный накопитель энергии и применить отработанный серийный инвертор — электронный блок, который превращает постоянный ток в стандартный переменный ток (напряжение 220 вольт, частота 50 герц), на который рассчитаны все наши электроприборы — от рядовой электролампочки до компьютера или холодильника. Особо большой подарок, который получили создатели небольших световых электростанций (их даже неудобно называть электростанциями, всё оборудование занимает небольшой уголок в гараже), — это плёночные фотоэлементы. У них к.п.д. немного меньше, чем у кремниевых, но и цена во много раз ниже. Кроме того, светочувствительную плёнку можно легко разметить на любой поверхности, например на стенах и крыше дома. Уже и создатели крупных станций включают в свои проекты тонкоплёночные фотоэлементы.



ВК-211. *Электрические сигналы делят на две группы. Первая — аналоговые сигналы, они как бы копируют исходный сигнал иной природы, например звук, создают его электрический аналог (копию). Цифровые сигналы — это тоже электрическое описание «чего-либо», например звука, но уже с помощью кода. Каждому значению «чего-либо» присвоен определённый код, например, из знаков 0 и 1. И тогда вместо копии «чего-либо» передаётся электрический поток знаков 1 и 0, описывающих эту реальность.*

ТВЭЛ (ТеплоВыделяющийЭЛемент) - главная действующая сила всех ядерных реакторов, снабжающих нас энергией с помощью мощных электростанций. В его таблетках (более 70% объема ТВЭЛа) радиоактивный уран либо плутоний, при распаде их ядер появляется тепло, которое в итоге превращают в электрическую энергию.
оболочка из циркония
наконечник
заглушка
таблетки диоксида урана
пружина
втулка

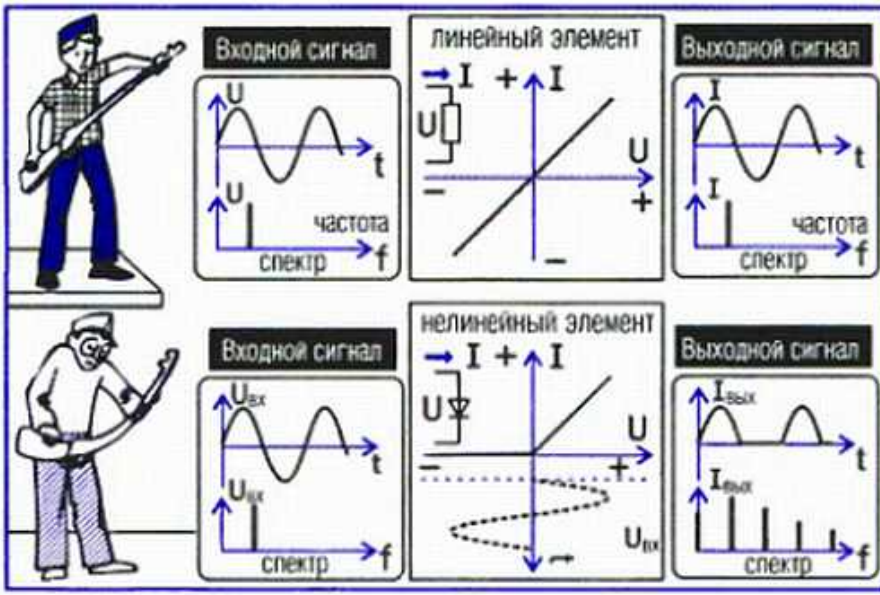
Р-89. УПАКОВАННОЕ В ТРУБКИ ТОПЛИВО ДЛЯ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ПРИХОДИТ С ЗАВОДСКИХ КОНВЕЙЕРОВ. Первая в мире атомная электростанция мощностью 5 МВт (1 мегаватт = 1000 киловатт) была

построена в Калужской области вблизи города Обнинск и начала работать в июне 1954 года. А через полвека в мире было уже около 440 крупных атомных электростанций с общей мощностью 374 ГВт (1 гигаватт = 1000 МВт = 1000 000 кВт), то есть в 75 000 раз больше, чем у первой станции. Новые станции производили в США 830 кВт-часов электроэнергии в год, во Франции — 440, в Японии — 260, в России — 160, в Южной Корее — 142, в Германии — 140. Столь быстрое продвижение атомной электроэнергетики прежде всего, видимо, объясняется тем, что с самого начала для неё были тщательно продуманы и стандартизованы инженерные решения, оптимальные для большой индустрии. Возьмём, к примеру, столь сложные процессы, как загрузка в реактор изотопов урана или плутония, отдающих энергию при их распаде, и в конце рабочего цикла разгрузка реактора. Эти проблемы достаточно просто решены с помощью тепловыделяющих элементов, которые так и называются ТВЭЛ — тепловыделяющий элемент. Он представляет собой достаточно длинную тонкую металлическую трубку — её диаметр около сантиметра, длина 3 м 83 см, а длина всего ТВЭЛа на 7 миллиметров больше. Основное место в трубке занимает прижатый пружиной столб герметичных металлических таблеток, его длина 3 м 53 см. В таблетках, в зависимости от типа реактора, находится уран, плутоний или их определённые соединения с другими элементами. Конструкция ТВЭЛов рассчитана на изготовление в заводских условиях, в основном на автоматических линиях, как говорится, без прикосновения человеческой руки. Точно так же на самой станции роботы устанавливают ТВЭЛы и снимают их по окончании цикла не менее чем через несколько месяцев. О том, насколько удачной оказалась принятая в своё время система подачи топлива в реактор, говорит, в частности, то, что российская компания «ТВЭЛ» поставляет топливо для 80 крупных реакторов, что составляет 17 % мирового рынка.

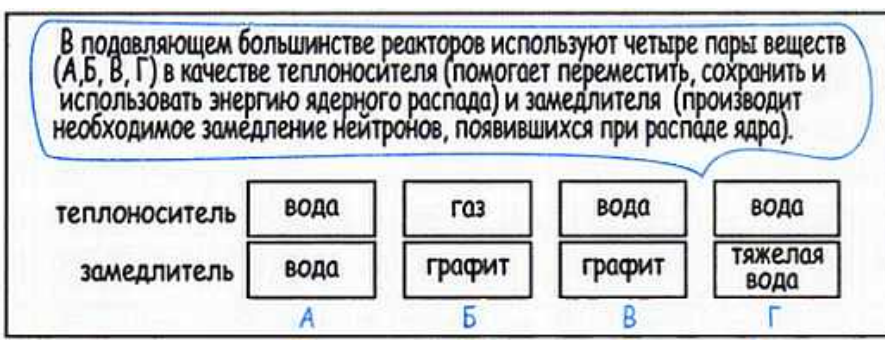
Ну и, наконец, о самом оптимистичном явлении в непростом деле превращения бесплатного света в работающее электричество. Не просто появились, а стали уже рядовым явлением микромощные потребители электрической энергии, для

питания которых вполне хватает того, что даёт прямоугольная пластинка из четырёх фотоэлементов общим размером 28 на 8 миллиметров. Эта световая «электростанция» даже в не слишком светлой комнате превращает попавший к ней свет в электричество, которого вполне достаточно для нормальной работы электронного калькулятора или небольшого радиоприёмника. Это символ, который напоминает: пропадающая пока энергия солнечного света ещё поработает в электрическом цехе мировой технологии.

У другого бесплатного альтернативного источника энергии для электростанций, у ветра, несмотря на совершенно иную физическую природу и происхождение, те же в основном главные проблемы, что и у солнечного света, пролетевшего 150 миллионов километров от Солнца к Земле. Ветер хотя и не имеет ночного перерыва, но он тоже заметно меняется. И для него тоже нужна память, например аккумуляторы, которые всегда будут выдавать постоянный ток, а ветрогенератор лишь будет их подзаряжать, когда меньше, когда больше, но в среднем нормально, достаточно. Кроме того, ветрогенератору нужен инвертор, чтобы включить этот генератор в общую сеть страны с переменным током, имеющим частоту 50 герц. Инвертор нужен и для того, чтобы постоянное напряжение от аккумуляторов, подзаряжаемых ветрогенератором, превратить в стандартное переменное напряжение (220 вольт, 50 герц) и передать его через местную сеть пользователю. Эти пояснения позволяют вам сделать вывод: ветрогенераторы в основном бывают двух видов. Во-первых, это сравнительно большие и мощные машины, которые, как и другие электростанции, включаются в общенациональную электросеть. И во-вторых, это сравнительно небольшие и совсем небольшие генераторы, которые снабжают электричеством удалённый посёлок или даже отдельный дачный дом.



ВК-212. *Настал момент отметить, что есть элементы схемы, у которых график зависимости тока от напряжения — прямая линия, их и называют линейными. И есть элементы, у которых график этой зависимости — ломаная или изогнутая линия, это нелинейные элементы. Линейные элементы нужны в усилителях, через них сигнал должен пройти без искажений. А нелинейные элементы обязательно применяют там, где нужно исказить сигнал, изменить его спектр, получить новые синусоидальные составляющие.*



Р-90. УЗАКОНЕННЫЕ КОМПЛЕКТЫ ГЛАВНЫХ ДЕЙСТВУЮЩИХ СИЛ. Ещё один пример продуманной и проверенной системы в атомной энергетике — четыре комплекта теплоносителя и замедлителя нейтронов (А, Б, В, Г). Все они позволяют реактору устойчиво работать

и оперативно, в том числе с помощью автоматики, регулировать свой режим.

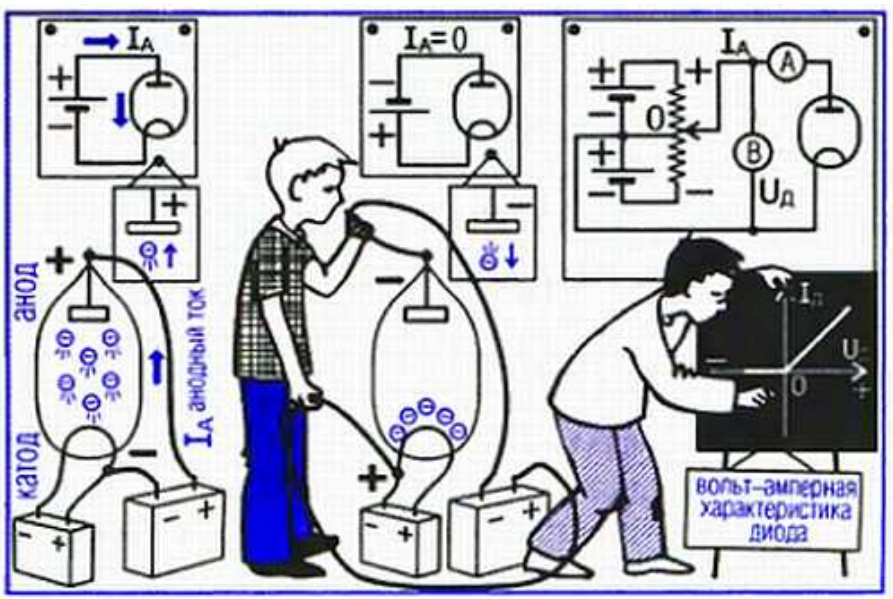
Примерно две тысячи лет назад человек начал использовать энергию ветра для вращения тяжёлых мельничных жерновов. А 120 лет назад в Дании была построена первая электростанция, где ротор генератора приводился в движение энергией ветра. Несколько десятилетий ветроэнергетика развивалась активно и успешно, а затем наступило затишье, и интерес к ветроагрегатам вновь появился всего лишь 20–30 лет назад. Сейчас некоторые страны далеко продвинулись вперед в этой области — в Дании, например, в 2009 году 20 % всей электроэнергии произвели ветрогенераторы, в Португалии — 16 %, в Ирландии — 14 %, в Испании — 13 %, в Германии — 8 %. Французы планируют к 2020 году построить ветроэлектростанции общей мощностью 25 000 мегаватт, из них на ветрогенераторы, поставленные в прибрежных морских водах, придётся 6000 мегаватт, а это две такие станции, как Богучанская ГЭС. Ещё один альтернативный источник энергии — тепло Земли. Напомним, что мы с вами живём, выращиваем хлеб, строим дома и электростанции на сравнительно тонкой наружной твёрдой оболочке нашей планеты, на так называемой земной коре. Её толщина от 6 (под океанами) до 30–50 километров. Если мысленно двигаться вглубь Земли, то за корой следует сначала твёрдая и горячая, а затем вязкая и очень горячая мантия и, наконец, земное ядро, температура которого, возможно, доходит до 7000 градусов. Центр планеты находится на расстоянии 6371 километра от её поверхности.

В некоторых местах большие внутренние области земной коры прогреваются теплом мантии настолько, что, пробурив скважины глубиной 200–500 метров, можно получить из них горячую воду и даже воду с горячим паром, который в итоге прекрасно работает в сравнительно небольших паровых турбинах. Так, например, на Камчатке, в районе реки Паужетки, из 20 пробуренных разведочных скважин геологи отобрали две, и на них в дальнейшем была построена электростанция с двумя паровыми турбогенераторами по 2,5 мегаватта каждый. Этой мощности вполне хватило для снабжения электричеством окружающих поселений. Энергию Паужетской ГеоТЭС, разумеется, даёт бесплатное подземное тепло, в числе его достоинств и то, что источник этот будет надежно работать долгие годы.

Само появление горячей воды в некоторых холодных районах известно давно, достаточно вспомнить гейзеры, бросающие вверх

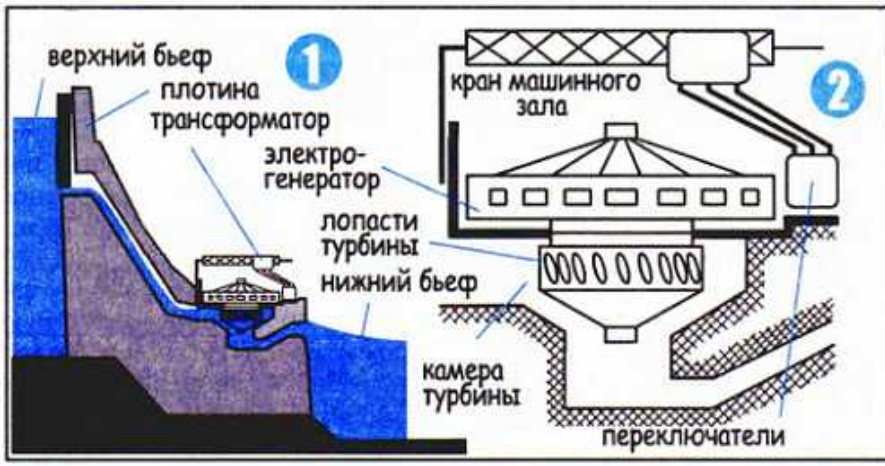
струю горячей воды в заснеженных районах Камчатки или Исландии. Но вот оказалось, что тепловую энергию для не очень больших электростанций можно найти под землёй и в тех районах, где никто и не думал об этом подземном источнике тепла. Говорят, что в Западной Сибири, где гейзеров никто в глаза не видел, обнаружено огромное подземное море с температурой воды 70–90 градусов. В 2010 году общая мощность электростанций, получающих электричество за счёт энергии подземного тепла, составила почти 11 тысяч мегаватт, из них в США — 3 тысячи, на Филиппинах — 2 тысячи, в Индонезии — 1,2 тысячи, в Италии — 843, в Исландии — 575, в Сальвадоре — 204, в Кении — 167, в России — 82, в Турции — 82, в Китае — 24, во Франции — 16, в Австрии — 1,4 мегаватта.

Последний в нашем коротком списке источников альтернативной энергии для электростанций — наш природный спутник Луна. Как известно, Луна вращается вокруг Земли и делает полный оборот вокруг нашей планеты примерно за 28 дней. При этом Земля продолжает, как всегда, вращаться вокруг своей оси, и благодаря этому Луна каждые сутки проходит над всей земной поверхностью.



ВК-213. *Первая электронная лампа — электровакуумный диод — появилась в начале прошлого века и особой сенсации не вызвала. Она не хуже уже созданных твердотельных диодов пропускала ток только в одну сторону, имела, естественно, нелинейную характеристику и большое сопротивление при отрицательном*

напряжении на аноде. Прямой ток в диоде (на аноде «плюс») создавали свободные электроны, они появлялись в районе катода, выскакивая из него при сильном нагреве небольшой накальной батареей.



Р-91. СУТКАМИ, НЕДЕЛЯМИ, ГОДАМИ БЕСПЛАТНО РАБОТАЮТ НА НАС ТРИЛЛИОНЫ ТОНН ПАДАЮЩЕЙ ВОДЫ. Слово «бесплатное» в данном случае, конечно, некоторое преувеличение — падающая вниз вода действительно работает бесплатно и нефть или уголь не нужно возить на электростанцию эшелонами. Но строительство гидростанции (ГЭС) плюс оплата грамотной команды и абсолютная защита от маловероятного, но всё же возможного развития событий, стоят недёшево. Достаточно вспомнить недавнюю аварию на Саяно-Шушенской станции или прорыв китайской плотины Баньцяо на реке Жухэ, из-за чего были затоплены огромные территории и погибло 170 тысяч человек. Проектировать такие системы и управлять ими нельзя, как привычной старой керосинкой, сложная техника требует иной организованности, порядка и дисциплины. И иных затрат.

Сегодня в мире более 20 процентов всего электричества вырабатывают ГЭС. Есть страны, например Швеция, Норвегия, Канада, Исландия и другие, где ГЭС вырабатывают в несколько раз большую часть энергии, а в Парагвае она вообще составляет 100 процентов. По принципу действия почти все ГЭС очень похожи.

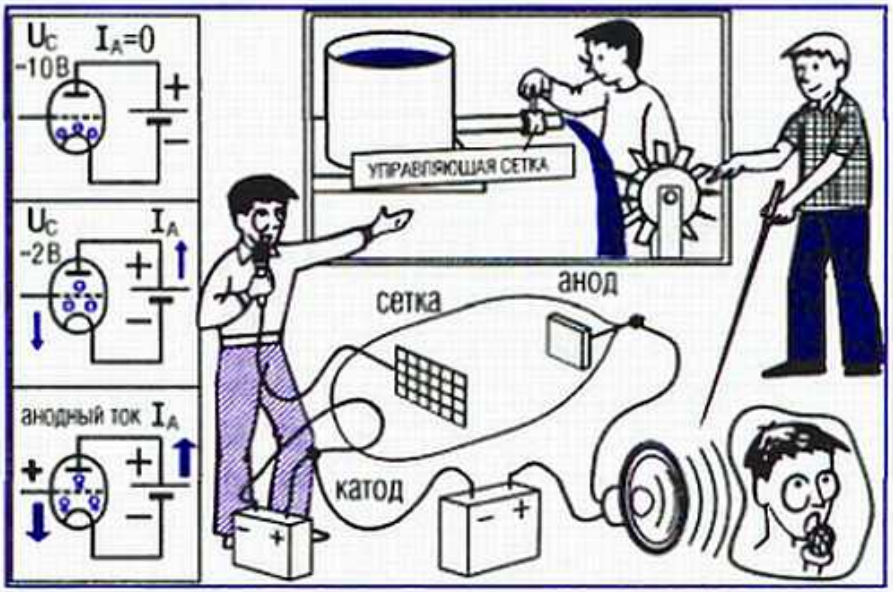
Мощная, чаще всего бетонная плотина перегораживает реку и заметно, часто на 60–70 метров, поднимает уровень воды, которая будет работать в турбинах (на Саяно-Шушенской ГЭС высота плотины 245 метров). Пройдя путь от верхнего бьефа до нижнего и, набрав большую энергию, поток воды вращает гидротурбину и вместе с ней ротор электрогенератора. Он за счёт электромагнитной индукции создаёт напряжение, которое, пройдя мощные трансформаторы, отправляется к потребителю.

Мы привыкли считать Луну сравнительно небольшим небесным телом, она действительно меньше Земли — по диаметру раза в два, по массе примерно в девять раз. Но всё же это два больших космических тела с огромной массой (Земля 600 миллионов триллионов тонн, Луна 70 миллионов триллионов тонн), и они достаточно энергично взаимодействуют своими гравитационными силами. Так, именно за счёт гравитационного притяжения к Земле Луна не уходит со своей орбиты и много лет движется по привычной дорожке вокруг Земли.

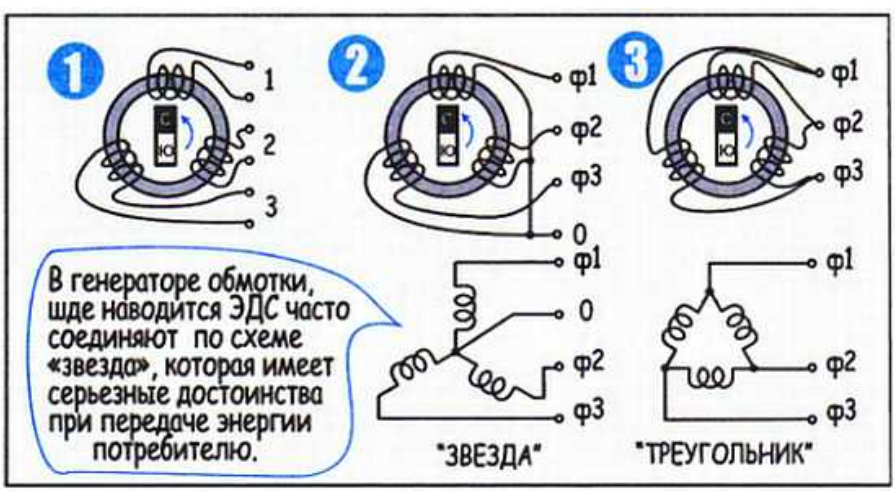
Астрономы определили, что Земля наша сформировалась примерно 4,8 миллиарда лет назад, вскоре и Луна появилась на своей орбите. За столь большой отрезок времени (почти 5 миллиардов лет — огромное время!) суммировались какие-то мелкие события и из-за этого происходили заметные изменения скорости вращения Земли и положения лунной орбиты. Но мы не будем сейчас подробно говорить об этом и обратим своё внимание на конечный результат, связанный с получением энергии, которая необходима электростанциям. А результат этот таков: Луна, двигаясь над земной поверхностью (фактически движется, то есть вращается, Земля, а Луна за сутки проходит лишь 3,6 % своей круговой орбиты), гравитационным притяжением старается хоть сколько-нибудь поднять то, что находится под ней. В итоге у берегов океанов и открытых морей заметно поднимается уровень воды, а примерно через 12 часов он становится предельно низким, ниже, чем бывает без влияния Луны. Эти явления уже давно получили наименования приливы и отливы. Важно отметить, что у Луны хватает сил, чтобы поднять воду лишь на 30–40 сантиметров, это показали измерения, сделанные в открытом море. Но благодаря влиянию берегов и прибрежного дна уровень воды при приливе кое-где оказывается выше, чем при отливе на 8, 12 и даже на 18 метров.

После сказанного, думается, уже ясно, что нужно делать. Во-

первых, нужно найти на берегу место с хорошим соотношением уровней воды прилив-отлив. Затем необходимо отгородить это место плотиной и во время прилива легко пропускать через неё воду в водохранилище. Когда прилив закончится, нужно выпускать воду из водохранилища в море, но выпускать её через гидротурбины, которые введут в действие электрогенераторы. В итоге мы получим уже знакомую нам гидроэлектростанцию, которую так и называют — приливная ГЭС. Кто-то раскопал, что первая приливная ГЭС мощностью 635 киловатт была построена еще в 1913 году в Великобритании, недалеко от Ливерпуля. Но первой всё же считают крупную станцию «Ля Ране» мощностью 240 мегаватт (240 тысяч киловатт), построенную французами в 1968 году. Через два года дала ток вторая в мире, на этот раз русская приливная станция мощностью 1,7 мегаватта, построенная дешёвым наплавным методом в заливе Кислая губа в Баренцевом море. Станция наверняка заработала бы лет на пять раньше, если бы вдохновителю и организатору всего этого дела Льву Борисовичу Бернштейну не пришлось преодолеть столько бессмысленных противодействий бюрократов и скептиков. Сейчас в мире уже довольно много приливных станций, в том числе и широко известных, таких, скажем, как канадская «Аннаполис» мощностью 20 мегаватт и южнокорейская «Шива Лейк» мощностью 254 мегаватта. Есть и готовые проекты, в том числе российские, для будущих станций на 8000 и на 87 ООО мегаватт в северных морях. Специалисты по защите природы подсчитали, что в морях и океанах нашего мира есть возможность построить приливные электростанции, суммарная мощность которых в 5000 раз превысит все мировые потребности в электричестве. Может быть, в этих расчётах и есть какие-то ошибки, но, думается, не в 5000 раз.



ВК-214. *Настоящую революцию в радиоэлектронике совершила трёхэлектродная лампа — вакуумный триод. Появилась она в 1907 году, когда инженер Ли де Форест на пути электронов в диоде поставил сетку и стал подавать на неё слабые сигналы. При изменении напряжения на сетке она помогала или препятствовала движению электронов к аноду — управляла анодным током. Сигнал на сетке, управляя анодным током, создавал в анодной цепи свою мощную копию — триод усиливал слабые сигналы.*



Р-92. ТРИ НАПРЯЖЕНИЯ ПОСТУПАЮТ С ТРЁХ ОБМОТОК, СОЕДИНЁННЫХ ВНУТРИ ОДНОГО

МОЩНОГО ГЕНЕРАТОРА. В основном тексте книги рассказано о том, почему в мощных генераторах обмотки, в которых наводится э.д.с., расположены в статоре, а в роторе вращается электромагнит, который и наводит э.д.с. в этих обмотках. Кроме того, нужно отметить, что уже давно в основном используют так называемые трёхфазные системы переменного тока. Поэтому в современных генераторах, особенно в мощных, в статоре равномерно по кругу расположены три отдельные обмотки, с которых можно получить три отдельных независимых напряжения (1) и вывести их из генератора шестью проводами. Однако эти обмотки соединяют внутри генератора и так, что наведённые напряжения можно вывести с помощью четырёх или трёх проводов. В первом случае соединение обмоток называется «звезда» (2, 4), во втором случае — «треугольник» (3, 5). Каждая из этих систем имеет свои особенности, существенные, в частности, для получателя электроэнергии (Р-93).

Настал момент выполнить обещание, данное читателю в самом начале, — ещё несколько слов про солнечный свет. Большая часть энергии, которую сегодня использует человек, подарена нам Солнцем.

Уголь, нефть, бензин, газ — это выращенные когда-то Солнцем растения, которые миллиарды лет консервировались в подземных кладовых. Вода морей и океанов благодаря Солнцу испаряется, сбирается в тучи, а затем дождями падает вниз и создаёт реки, которые вращают турбины наших гидроэлектростанций. Специальные живые клетки практически всех растений имеют свои собственные молекулярные солнечные «электростанции», которые в сложном химическом процессе по имени фотосинтез добывают и преобразуют энергию из мельчайших её солнечных порций. За счёт этих преобразований в итоге растёт и развивается всё живое на Земле. Обо всех этих изумительных творениях природы полезно вспоминать, когда пытаешься широко использовать её находки или планируешь расширить её арсенал работы с энергией.

Т-177. **Электростанция в чемодане и даже в кармане**. Бывают ситуации, когда нельзя или невыгодно получать энергию от мощной межрайонной станции, например, в очень удалённом от неё небольшом таёжном посёлке или на дальней зимовке метеорологов. Кроме того, очень часто нужно иметь свой

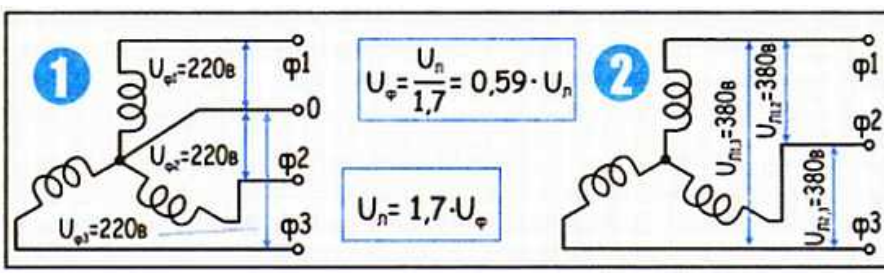
собственный, автономный электрогенератор, как, например, для питания бортовой сети самолёта или в качестве резерва на станции неотложной медицинской помощи. На этот случай существуют электрогенераторы небольшой и очень небольшой мощности со своим запасом топлива.

В последние годы широко применяются небольшие передвижные электростанции, обычно мощностью от 0,5 до 10 кВт, с приводом от бензинового двигателя. Их автоматика поддерживает параметры переменного тока (220 В, 50 Гц или 110 В, 60 Гц) настолько хорошо, что к станции спокойно подключают не только холодильник или осветительные приборы, но также телевизор, видеомагнитофон и компьютер.

Электрогенератор малой мощности, кстати, есть в каждом автомобиле, через ременную передачу его приводит в движение сам автомобильный двигатель, затрачивая на это пару процентов своей бензиновой мощности. Генератор необходим для подзарядки стартового аккумулятора, и кроме того он участвует в питании всей автомобильной электросети — от освещения до зажигания. Аккумулятор, разумеется, нужно заряжать постоянным током, и ещё недавно в автомобиле работал генератор постоянного тока с коллектором, угольными щётками, вибрационными регуляторами напряжения — оно должно оставаться неизменным. Сейчас монополистом стал более простой и более надёжный генератор переменного тока с полупроводниковым выпрямителем и встроенным транзисторным регулятором напряжения.

Небольшие электрогенераторы с ручным приводом входили в комплект некоторых военных радиостанций для разведчиков — на случай если где-нибудь в тылу врага закончатся батареи. Множество подобных маленьких электрических машин, вращаемых мускульной силой, можно увидеть на велосипедах, их электрическая фара позволяет даже ночью пользоваться этим замечательным транспортом. И совсем уже миниатюрная, но вполне настоящая электростанция — безбатарейный карманный фонарик. Чтобы он давал свет, нужно 30–40 раз в минуту сжимать кулак и с помощью системы рычагов вращать ротор электрогенератора. Его мощность всего 0,2 ватта, рукой много не наработаешь.

ВК-215. *Через сорок лет после появления трёхэлектродной лампы был создан усилительный полупроводниковый триод — транзистор. Он мог иметь структуру* ***p-n-p*** *или* ***n-p-n****, а значит, всегда имел два* ***pn****-перехода. Его зоны называются «эмиттер» (выбрасывающий), «база» и «коллектор» (собирающий). Эмиттерный* ***pn****-переход включён в прямом направлении и легко поставляет заряды в базу. Просочившись сквозь неё, они попадают в коллекторный переход и участвуют в создании сильного коллекторного тока.*



Р-93. ВМЕСТО ОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ БЕЗ ВСЯКИХ ПРОБЛЕМ ПОЛУЧАЕМ ДВА РАЗНЫХ. Потребитель, как правило, получает электроэнергию с понижающего трансформатора, обслуживающего большой многоквартирный дом или несколько дачных домиков (в этом случае трансформатор часто висит на столбе). Вторичная обмотка такого трансформатора, как правило,

имеет три секции, соединённые звездой, и получателю энергии её можно направить с одной из этих секций — с одной из фазовых обмоток. В квартиру или в дачный дом при этом входят два провода с одной из фазовых обмоток и общий, вводится, как принято говорить, одно из трех фазовых напряжений $\mathbf{U}_ф$ (1). В случае если каким-то аппаратам или машинам необходимо более высокое напряжение, например мощной газовой плите или подъёмной машине лифта, то к ним от того же трансформатора можно подвести линейное напряжение $\mathbf{U}_л$ (2), которое почти в два раза (точнее в 1,7 раза) больше фазового.

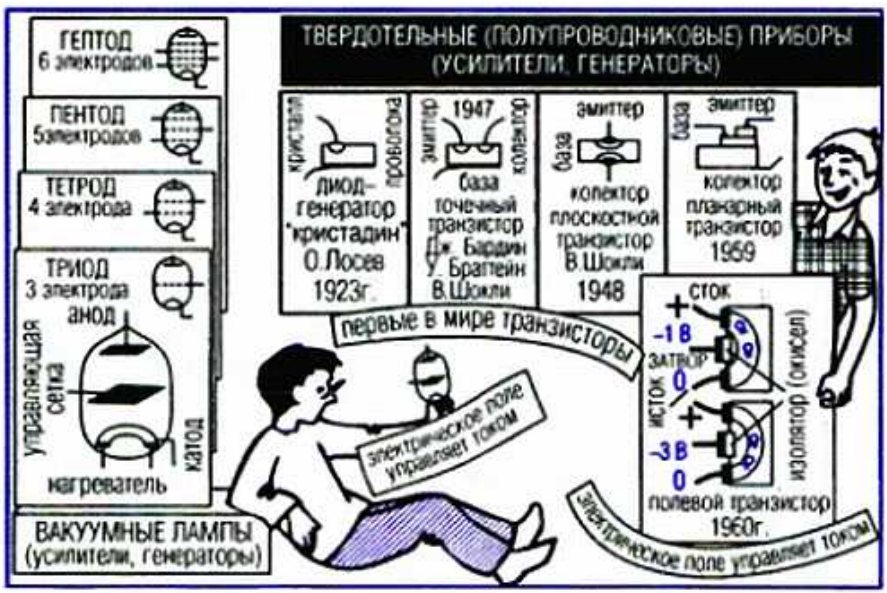
Т-178. **Аккумулятор и гальванический элемент — не кладовка, а химический комбинат.** В каком-то смысле аккумулятор или гальванический элемент делают то же самое, что и хорошо знакомый нам конденсатор, — накапливают электрические заряды на двух специальных деталях, на двух электродах. Но конденсатор получает готовые заряды от постороннего источника напряжения и удерживает их на своих обкладках силой электрического поля, а в аккумуляторе и гальваническом элементе свободные заряды появляются в результате определённых химических реакций. Отсюда и название химические источники тока. Существуют, правда, электролитические конденсаторы, в которых для накопления зарядов тоже используют химические процессы, и за счёт этого ёмкость конденсатора получается довольно большой.

В аккумуляторе важнейшие события происходят в жидкости, в которую погружены электроды. Эта жидкость называется «электролит», она участник всех химических и электрических процессов. В электролит, как уже говорилось, погружены два токопроводящих электрода — катод (от греческого «катодос» — «спуск») и анод (от греческого «анодос» — «путь вверх»). Всё, что происходит в аккумуляторе дальше — это результат химических взаимодействий электролита с электродами. Физическая, а точнее, химическая основа создания э.д.с. в аккумуляторах и гальванических элементах была коротко представлена в разделе Т-41. У аккумулятора существуют два основных рабочих режима — зарядка, когда внешний источник энергии создаёт в нём запас энергии, и разряд, когда аккумулятор отдаёт запасённую энергию в виде электрического тока в нагрузке.

При зарядке от внешнего источника к электродам аккумулятора подводят постоянное напряжение — к катоду

«минус», к аноду «плюс». В цепи появляется зарядный ток (Р-28), и в итоге создаётся собственная э.д.с. аккумулятора. Она действует и после отключения внешнего напряжения и сохраняет его полярность — на аноде «плюс», на катоде «минус».

При разрядке к заряженному аккумулятору подключают нагрузку, и в цепи появляется разрядный ток — электроны, как всегда, во внеш ней цепи двигаются от «минуса» к «плюсу», то есть от катода к аноду, а условное направление тока, как всегда, от «плюса» к «минусу».



ВК-216. *Сорок лет вакуумные лампы совершенствовались и служили основой развития радиоэлектроники. Несмотря на интересные находки, первый транзистор был создан в 1947 году группой физиков-теоретиков высокого класса. Более чем через 12 лет появился совершенно новый полевой транзистор. Его током с электрода затвор управляет слабый сигнал, воздействуя на ток своим электрическим полем. Ток, из которого формируется усиленный сигнал, подводится к электроду исток и снимается с электрода сток уже в усиленном виде.*

Химический источник тока не конденсатор, не кладовка, куда свозится готовая продукция (Т-8) — избыточные заряды. Химический источник тока, в частности, аккумулятор, — это сложная химическая машина, и при зарядке накопление ионов на электродах всего лишь начало цепочки химических превращений, в результате которых катод, запасая химическую энергию,

становится «минусом», а анод «плюсом».

Мы не будем в деталях разбирать все эти химические процессы, а лишь отметим: в конденсаторе накопление готовых избыточных зарядов длится секунды, а зарядка аккумулятора может занять несколько часов. Потому что зарядка аккумулятора связана со сложной химической перестройкой вещества и, конечно, с накоплением несравнимо большей энергии. Так, например, конденсатор ёмкостью $C = 5000$ мкФ, заряженный напряжением 2 В, может поддерживать в цепи средний ток 1 мА в течение 10 секунд, а одна банка небольшого автомобильного аккумулятора при том же напряжении 2 В будет поддерживать в цепи ток 1 мА в течение 50 000 часов.

Более двухсот лет учёные и изобретатели ищут так называемые гальванические пары — вещества на роль электродов и электролита для химических источников тока. Для аккумуляторов пока удалось подобрать лишь несколько комплектов достойных гальванических пар, и на их основе выпускается несколько типов химических накопителей электричества.

Самый распространённый — кислотный аккумулятор, в нём электролитом служит раствор серной кислоты (H_2SO_4), а электроды изготовлены в основном из пористых соединений свинца с сурьмой. Аккумуляторы обычно называют по типу применяемого электролита или по основному материалу электродов. В частности, широко применяемые кислотные аккумуляторы называют ещё и свинцовыми. Электролит в двух разновидностях щелочного аккумулятора — едкий натрий (NaOH) или едкий калий (KOH), известные щёлочи. О веществе электродов этих аккумуляторов говорят названия «кадмиево-никелевый» аккумулятор и «железо-никелевый». У серебряно-цинкового аккумулятора электролитом служит химический чистый гидроксид калия.

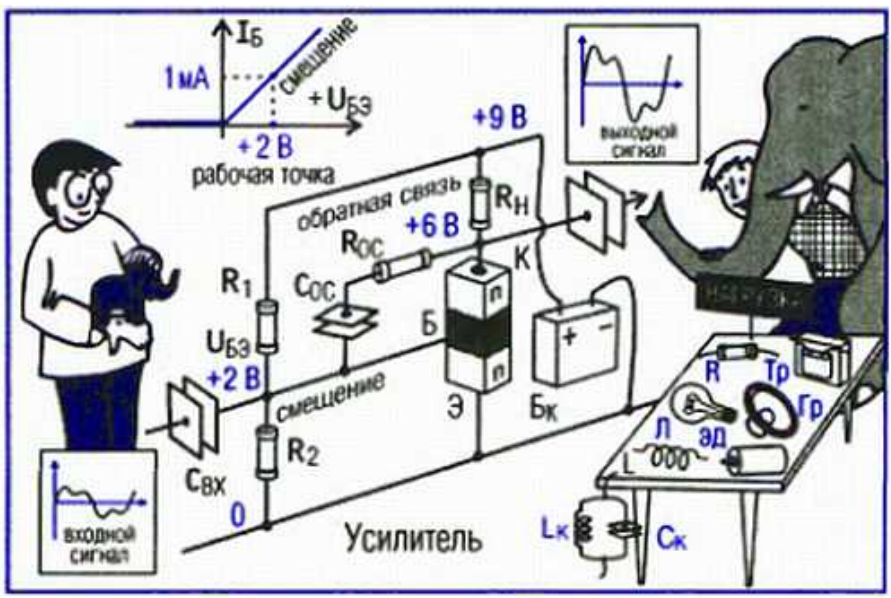
ВК-217. *Начавшись с простейших полупроводниковых диодов и несовершенных еще транзисторов, электроника сформировала две огромные области — микроэлектронику и силовую электронику. Некоторые результаты: крупносерийное изготовление транзисторов, занимающих в кристалле область размером 50 нанометров (на площади с типографскую точку разместились бы сотни тысяч таких транзисторов), и, с другой стороны, полупроводниковые переключатели, рассчитанные на токи в сотни и даже тысячи ампер.*

Несколько слов о нескольких характеристиках аккумулятора. Во-первых, это электродвижущая сила, она зависит только от самой гальванической пары, и у кислотных аккумуляторов самая большая — 2,1 В, у щелочных и серебряно-цинковых примерно 1,2 В. Реальное напряжение на выходе аккумулятора, конечно, чуть меньше — что-то теряется на внутреннем сопротивлении, и тем больше, чем больше потребляемый ток. Кроме того, внутреннее сопротивление растёт с возрастом аккумулятора и числом циклов заряд-разряд. Растёт оно из-за медленного разрушения электродов и загрязнения электролита их «мусором». Это приводит также к саморазряду аккумулятора, при старении он сам по себе разряжается всё быстрее.

Чтобы увеличить напряжение, отдельные аккумуляторы, или, как принято говорить, отдельные банки, соединяют последовательно в батарею. Так, у автомобильной аккумуляторной батареи обычно 6 банок, без нагрузки их

напряжение 12,6 В.

О том, сколько энергии запасает аккумулятор, говорит очень важная характеристика — его ёмкость. Несмотря на схожесть названия, она измеряется не в фарадах, а в ампер-часах, сокращённо А·ч. Если аккумулятор ёмкостью 60 А·ч полностью заряжен, то от него можно потреблять ток 1 А в течение 60 часов, или 5 А в течение 12 часов, или 60 А в течение часа. Можно продолжить эти арифметические упражнения, но не беспредельно — у каждого типа аккумуляторов есть рекомендованный ток зарядки (10–15 % от ёмкости) и предельно допустимый разрядный ток.



ВК-218. *В схеме транзисторного усилителя обычно есть делитель напряжения, он подаёт на базу начальное смещение. Оно открывает эмиттерный* ***pn****-переход и выводит режим усилителя в нужную рабочую точку. В коллекторную цепь включена нагрузка — в ней выделяется мощность усиленного сигнала. Нагрузкой может быть громкоговоритель, электродвигатель, колебательный контур, а также просто сопротивление (резистор). По цепочке обратной связи часть усиленного сигнала возвращают во входную цепь.*

Здесь опять кислотный аккумулятор вне конкуренции, даже при небольшой ёмкости 60 А·ч от него можно потреблять ток до 200 А, что-то около этого может понадобиться автомобильному стартеру, выполняющему нелёгкую работу при запуске двигателя,

особенно зимой.

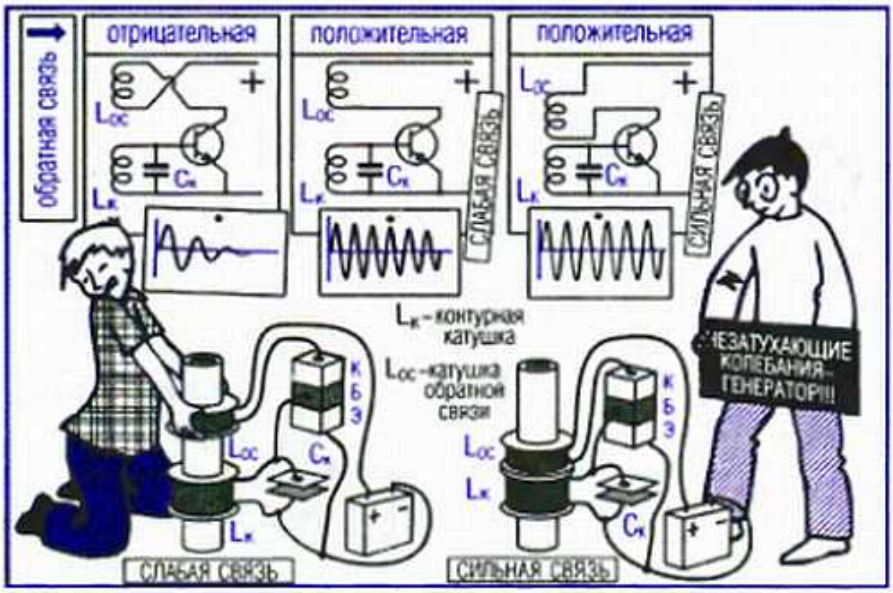
Ещё одна очень интересная характеристика, хотя вспоминают о ней нечасто, — запасаемая аккумулятором энергия, которая приходится на килограмм массы. Именно с этой характеристики нужно начинать все размышления об электромобиле, которому так часто уделяет внимание пресса. Нетрудно подсчитать, что если от упомянутого кислотного автомобильного аккумулятора с напряжением 12,6 В и ёмкостью 60 А·ч потреблять ток 60 А, то он проработает 1 час, развивая мощность $\mathbf{P} = \mathbf{U}\cdot\mathbf{I} = 750$ Вт, то есть 0,75 кВт, а запасённая энергия составит 0,75 кВт·ч. Если считать, что масса такого аккумулятора примерно 7,5 кг, то его удельный энергозапас 0,1 киловатт-часа на килограмм массы.

Мощность двигателя даже на небольшом автомобиле примерно 40 лошадиных сил, или, что то же самое, 30 кВт. Чтобы 5 часов кормить электромобиль такой мощностью, нужно возить с собой аккумуляторную батарею массой 400 кг, что для маленького автомобиля многовато. Так что на пути создания электромобиля стоит малая удельная (на килограмм массы) энергоёмкость распространённых аккумуляторов.

Поэтому для личного электрического экипажа прежде всего ищут новые более энергоёмкие гальванические пары или вообще иные источники и преобразователи энергии, как, например, водородные. В то же время изобретатели находит промежуточные решения с использованием аккумуляторов, например, гибридный автомобиль. В нём есть и обычный бензиновый двигатель, и электрический привод, получающий энергию от аккумуляторов. Автоматика, в зависимости от режима движения, использует обе эти системы, что иногда позволяет расходовать на 30–50 % меньше бензина.

Уделив так много внимания аккумуляторам, можно коротко, без повторных пояснений, представить другой химический источник тока — гальванические элементы. В принципе в них происходят те же процессы, что и в аккумуляторе, но используются иные гальванические пары и вообще иная стратегия применения. Гальванический элемент просто выбрасывают, после того как он израсходует запас энергии, полученный при его изготовлении, — химическая система элемента, в отличие от аккумуляторной, не рассчитана на его повторную зарядку.

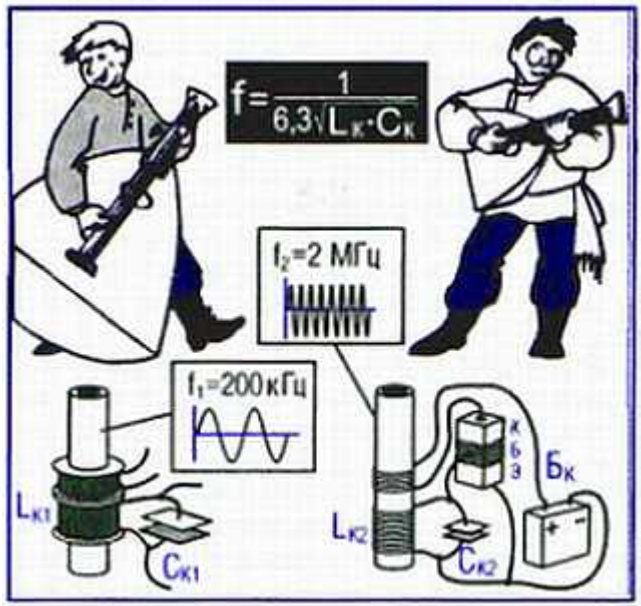
Выпускаются разные по размерам и конструкции гальванические элементы (Р-27), в том числе очень маленькие для наручных часов, микрокалькуляторов и других устройств с небольшим потреблением тока. Используется также несколько вариантов гальванической пары, как следствие, элементы несколько более дорогие, но с повышенной ёмкостью.



ВК-219. *Отрицательная обратная связь действует против основного входного сигнала, и это помогает уменьшить его искажения. Положительная обратная связь действует согласованно с входным сигналом, и, если она достаточно сильная, возникает самовозбуждение, усилитель превращается в генератор. В генераторе с колебательным контуром обратная связь уменьшает потери в этом контуре, и в нём возникают незатухающие колебания, их частоту можно менять, изменяя индуктивность и (или) ёмкость контура.*

Т-179. **Постоянный, переменный, пульсирующий — любой ток из любого. У электрической энергии много разных потребителей, и потребности у них тоже бывают разные**. В большинстве случаев вполне подходит сеть переменного тока с напряжением 220 вольт и с частотой 50 герц, она позволяет с помощью трансформатора повысить или понизить напряжение. Этот источник питания даёт возможность при необходимости получать достаточно большие мощности, использовать огромное разнообразие типовых двигателей, нагревателей, осветительных приборов, выпускаемых промышленностью. Однако в некоторых случаях потребителям нужен не переменный ток, а постоянный, например, для зарядки аккумуляторов. А тем, у кого есть источник постоянного тока, бывает нужен переменный ток. Не говоря уже о бессчётном множестве операций с электрическими токами в электронике, где решающую роль играет сам характер

изменений тока — именно в этих изменениях записана информация, главный объект и главный продукт электроники. Электронные схемы производят просто виртуозные преобразования электрических токов, но и чистая электротехника кое-что умеет.



ВК-220. *Частота собственных колебаний в контуре, которую он начнёт излучать, будучи включённым в схему генератора, может быть подсчитана по довольно простой формуле. Из неё видно, что частота эта в равной мере зависит от индуктивности* $L_к$ *и ёмкости* $C_к$ *контура: чем меньше эти индуктивность и ёмкость, тем выше частота. К этой зависимости хорошо бы привыкнуть, и даже просто взглянув на контурную катушку и конденсатор, примерно оценить, к какому диапазону частот относится контур.*

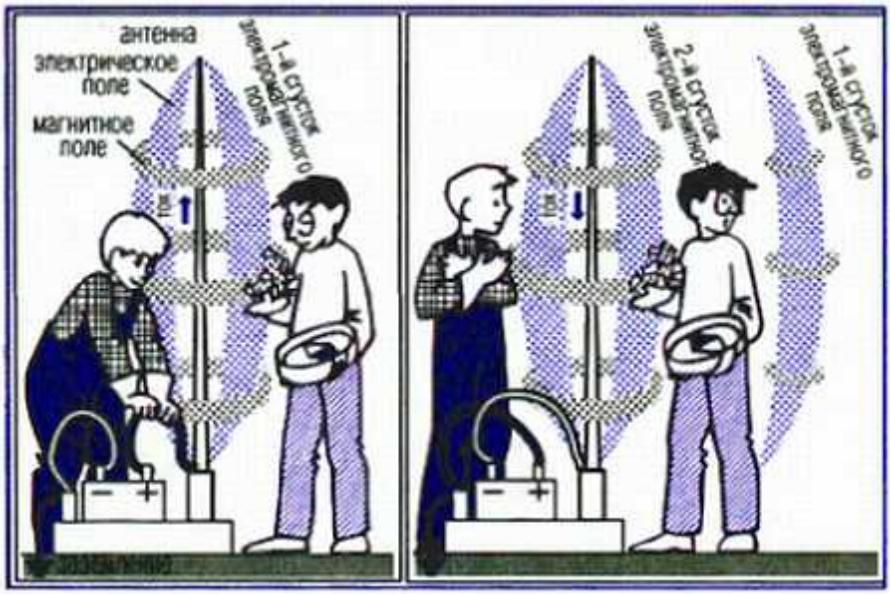
Когда-то из постоянного тока делали переменный и из переменного постоянный с помощью двух электрических машин: двигатель постоянного тока вращал генератор переменного тока или наоборот. Была даже машина унформер с одним ротором и двумя токосъёмными устройствами для переменного и постоянного тока. Подводишь постоянный ток — снимаешь переменный, подводишь переменный ток — снимаешь постоянный. Сейчас из переменного тока постоянный получают очень просто — с помощью выпрямителя (Р-99). Главные работники в нём — полупроводниковые диоды, они пропускают

ток только в одну сторону, и благодаря этому переменный ток становится пульсирующим. А в пульсирующем токе всегда есть постоянная составляющая — заряды, хоть рывками, но обязательно смещаются в одну сторону. Эту постоянную составляющую тока всегда можно выделить с помощью фильтров. А сами выпрямители бывают однополупериодные (они только половину периода формируют энергию постоянного тока) и двухполупериодные (весь период формирует энергию постоянного тока).

Получить переменный ток из постоянного можно с помощью механического прерывателя, электромагнитного вибратора и полупроводникового генератора. В последнем случае используют наиболее простые генераторы, знакомство с которыми у нас впереди.

Кстати, постоянный ток иногда преобразуют в переменный, чтобы с помощью повышающего трансформатора получить высокое напряжение, а из него нередко опять делают постоянное напряжение, но значительно более высокое. Многие телезрители, может быть, не знают, что в их старом телевизоре таким примерно способом получают постоянное напряжение 20–30 тысяч вольт, которое нужно подвести к кинескопу. В автомобиле с помощью транзисторных генераторов из постоянного напряжения 12 В получают несколько тысяч вольт переменного, оно необходимо для зажигания паров бензина в цилиндрах двигателя. Несколько десятилетий эта операция выполнялась с помощью механического прерывателя и высоковольтного трансформатора, хорошо известного старым водителям под именем бобина.

Электротехника освоила столько вариантов основных преобразований напряжений и токов, что потребитель может быть уверен: в каком виде ему нужно электричество, в таком он его и получит.



ВК-221. *Электромагнитные волны излучает любой проводник, по которому идёт переменный ток. Но для эффективного излучения используют токи высокой частоты и специальные передающие антенны. Высокочастотный ток непрерывно циркулирует в антенне, и она непрерывно направляет в пространство «сгустки» электрических и магнитных полей. Но каждый такой «сгусток», перестав получать энергию, пытается вернуться в антенну, но не успевает — его уже выталкивает следующий «сгусток».*

Т-180. **Спецназ из цеха генераторов.** Главная сила электроэнергетики — машинные генераторы. Их ближайший помощник — химические источники тока, которые, правда, в целом дают неуловимо малую часть всей потребляемой электроэнергии. И ещё во много раз меньше электрической энергии пока получают из других физических процессов в некоторых источниках специального назначения.

Один такой «спецназовский солдат» просто уверен, что со временем станет генералом (Т-8), — фотоэлементы, которые превращают световую энергию в электрическую, имеют уже определённые практические успехи и дают повод для проектов световых электростанций гигантской мощности. Другой специальный источник — термоэлемент, он напрямую, без посредников получает электрическую энергию из тепловой и мог бы произвести переворот в энергетике, если бы имел более высокий к.п.д. Правда, оказалось, что в каких-то особых случаях

можно удовлетвориться и тем, что есть. Много лет назад выпускался термогенератор мощностью несколько ватт для питания радиоаппаратуры, в частности, радиостанций в партизанских отрядах. Это был «бублик» с большим числом термоэлементов, который надевался на стекло керосиновой лампы.

Совсем мало энергии можно получить от электрических «спецназовцев» пьезокристаллов, на которых электрические заряды появляются при сжатии или иных механических деформациях. Пока пьезокристаллы, как источник слабых электрических сигналов, используются лишь в электронике, но кто знает, куда приведёт эта тропинка. И вообще трудно предсказать, какие физические процессы в будущем станут главными в производстве электроэнергии. Пока же электромагнитная индукция — вне конкуренции.

Глава 17
Миллион электрических профессий

Сидя в удобном кресле, почитывая свежую газету при мягком свете торшера, попивая при этом прохладный, из холодильника, яблочный сок и слушая тихую мелодию, плывущую из музыкального центра, мы готовы, если кто-нибудь напомнит, поразмышлять об удобствах, которые приносит нам электричество. Но при этом надо бы ещё подумать и о тех немалых благах — автомобилях, добротной одежде, изобилии продуктов, туристических комплексах на морском берегу, — которые мы получаем тоже не без помощи электричества. В частности, с помощью огромного многообразия незнакомых нам электрических машин, приборов, аппаратов, работающих во всех без исключения отраслях науки и промышленности, — от автоматизированного производства лекарств до капитального строительства.

Одним словом, посмотришь вокруг и, как ни старайся, не увидишь ничего такого, в чём бы не было чего-нибудь электрического.

Т-181. **Неутомимый работник — электрический двигатель**. Из огромного множества помогающих человеку электрических машин и приборов самые массовые, то есть применяемые наиболее широко, это электрическая лампочка и электрический двигатель. Проблемы их разработки и использования постепенно сформировали две самостоятельные области, как в технике и технологии, так и в серьёзной науке, это светотехника и электропривод. Последняя названная область занимается, в частности, тем, что исследует, как именно, каким способом электрическая машина приводит и может приводить в движение самые разные механизмы, скажем, станки или электропоезда. И, конечно, электропривод — это и сами электродвигатели, которых существует огромное разнообразие, как по мощности (от милливатт до нескольких тысяч киловатт), так и по способу электропитания и принципу действия.

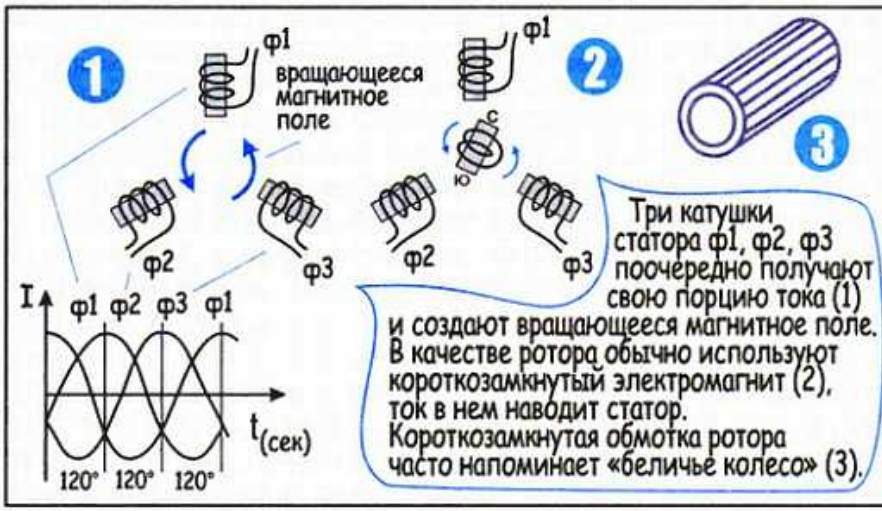
Особо часто используется неприхотливый, сравнительно простой и с хорошими рабочими характеристиками трёхфазный асинхронный двигатель. В его статоре расположены три обмотки, создающие вращающееся магнитное поле. В случае если

двигатель предназначен для однофазной сети (это то, что приходит в вашу квартиру, — квартирная сеть получает напряжение с одной фазы трёхфазного генератора), на помощь обмоткам статора приходит конденсатор. Он создаёт сдвиг фаз, то есть фактически создаёт второе, сдвинутое по фазе, напряжение, которое вместе с основным напряжением подводится к сдвинутым по окружности двум обмоткам статора, и вместе («вдвоём») они формируют вращающееся магнитное поле. У асинхронного двигателя небольшой мощности, примерно до 2 кВт, ротор, как правило, короткозамкнутый — в роторе расположены довольно толстые медные или алюминиевые проводники, торцы которых замкнуты кольцами (Р-94.3). Вся эта токопроводящая конструкция напоминает беличье колесо — круглую клетку, внутри которой белка, пытаясь бежать, перебирает лапками поперечные стержни и вращает таким образом клетку-колесо. В трёхфазном двигателе ток статорной обмотки наводит ток в короткозамкнутой обмотке ротора, этот роторный ток создаёт своё магнитное поле, и оно, схваченное вращающимся полем статора (Т-8), вращается вместе с ним, то есть заставляет вращаться ротор.

В мощных асинхронных двигателях обмотка статора нередко более сложная, она выводится на три контактных кольца и через них выходит во внешний мир. Это позволяет подключить к роторной обмотке реостаты и с их помощью менять в ней ток. В частности, его уменьшают в момент пуска, когда ток становится очень большим, и из-за этого асинхронный двигатель, который работает в режиме частых остановок и пусков, перегревается и может быстро выйти из строя. В маломощном двигателе такой проблемы нет, он быстро набирает обороты, и ток снижается до расчётной величины. Реостаты позволяют в некоторой степени менять характеристики двигателя, в частности, скольжение (а значит, и число оборотов), при котором у двигателя максимальный крутящий момент.

Как работает синхронный двигатель, проще всего понять на двухполюсном его варианте, который, как обратимая машина, в принципе не отличается от такого же синхронного генератора. У маломощного синхронного двигателя ротор — обычный постоянный магнит. Если раскрутить ротор, так чтобы он вращался с частотой питающего переменного тока, то он всегда будет втягиваться в магнитное поле обмоток статора — сменится направление тока в обмотке, а к ней уже подходит другой полюс постоянного магнита. Главное неудобство именно в этом «если раскрутить»: синхронный двигатель, в отличие от асинхронного, сам с места не трогается, его ротор действительно нужно

предварительно раскрутить до определённых оборотов, его, как принято говорить, нужно ввести в синхронизм. Зато после этого синхронный двигатель с довольно высокой точностью держит обороты даже при изменении механической нагрузки на валу (у асинхронного двигателя при увеличении нагрузки обороты могут снижаться на 10–15 %)


1
2
3
φ1
вращающееся магнитное поле
φ2
φ3
С
Ю
Три катушки статора φ1, φ2, φ3 поочередно получают свою порцию тока (1) и создают вращающееся магнитное поле. В качестве ротора обычно используют короткозамкнутый электромагнит (2), ток в нем наводит статор. Короткозамкнутая обмотка ротора часто напоминает «беличье колесо» (3).
I
φ1 φ2 φ3 φ1
t(сек)
120° 120° 120°

Р-94. ТРЁХФАЗНЫЙ ТОК ДВИГАЕТ ПО КРУГУ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СТАТОРА, ОНО ВРАЩАЕТ РОТОР И С НИМ РАБОЧУЮ ОСЬ ДВИГАТЕЛЯ. Основа этого двигателя — вращающееся магнитное поле. Его легко создать, имея трёхфазный генератор переменного ток и разместив в статоре двигателя три катушки на равном расстоянии одна от другой (1), — любая катушка отдалена от соседней на угол 120 градусов. Теперь подадим на эти катушки двигателя трехфазное напряжение с генератора — на катушку обозначенную **φ**1 подадим первую фазу, на **φ**2 — вторую и на **φ**3 третью. В этих катушках будет поочередно появляться ток, созданный генератором и 50 раз в секунду (в нашем опыте соблюдаются государственные стандарты) он будет создавать очередной виток вращающегося магнитного поля. Расположив в центре свободно вращающийся постоянный магнит, мы увидим, что он, судя по всему, вращается вместе с этим полем. То же самое произойдет, если заменить магнит электромагнитом — короткозамкнутой катушкой, ток в которой наводят электромагниты статора (2). Нам

остаётся добавить, что ротор (электромагнит) не может вращаться точно с той же скоростью, что и магнитное поле так как при этом охватывающее ротор поле не будет меняться и в его обмотке ток не наведется. Поэтому скорость вращения ротора (электромагнита) автоматически устанавливается меньшей, чем скорость вращающегося магнитного поля, а сконструированный нами двигатель называют асинхронным. Приставка *а-* в данном случае является отрицанием (как, например, в слове «аполитичный» — оторвавшийся от политической жизни), и название «асинхронный» означает «не синхронный».

Синхронный двигатель держит обороты до последнего, если ему слишком трудно, то он просто останавливается. А запускают его на холостом ходу, без нагрузки, с помощью другого небольшого двигателя. Или используют синхронный двигатель с асинхронным пуском — в нём есть дополнительные обмотки, которые на время пуска превращают двигатель в асинхронный, а затем отключаются, когда ротор входит в синхронизм.

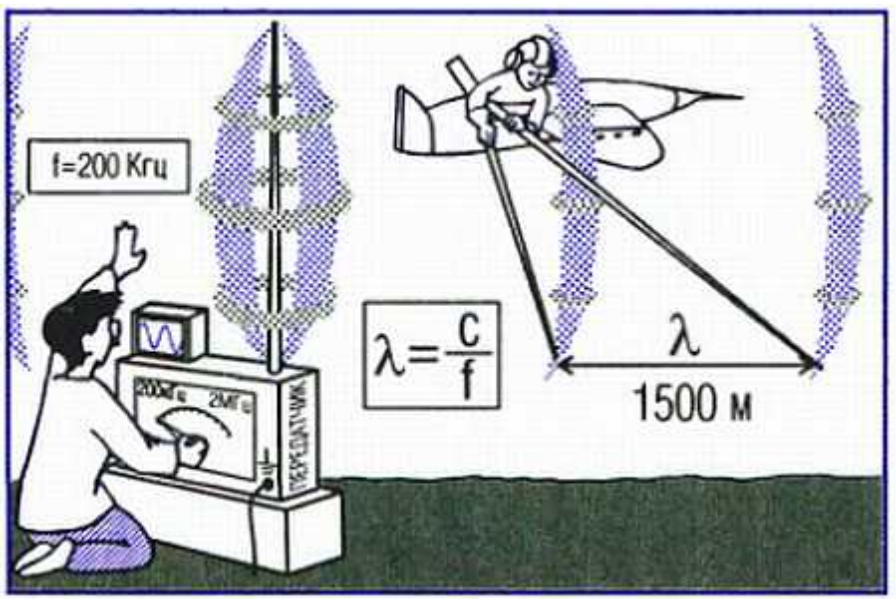
Выше уже говорилось о сложности, совершенстве и непростом характере электрических машин (Т-8), в полной мере это относится к двигателям. Такой, например, интересный факт: асинхронный двигатель в принципе не может войти в синхронизм. Если его ротор будет вращаться с той же скоростью, что и магнитное поле статора, то это поле не будет пересекать роторные витки, в них не наведётся ток, не возникнет магнитное поле ротора и он не будет вращаться. Поэтому ротор вращается чуть медленнее, чем магнитное поле статора, и это проскальзывание (официальный термин — скольжение) несколько возрастает с ростом нагрузки на валу.

Кстати, у трёхфазного асинхронного двигателя легко поменять направление вращения — достаточно поменять местами сетевые провода, подключённые к двум фазовым обмоткам.

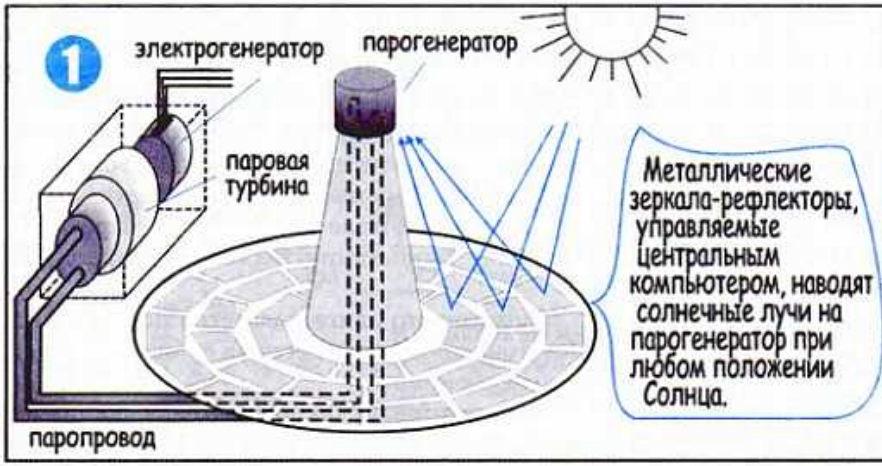
Любой двигатель можно рассматривать как индуктивное сопротивление X_L его обмоток и подключённое параллельно ему активное сопротивление $R_н$, которое отображает реальную, активную работу, выполняемую двигателем. С увеличением механической нагрузки на валу такое условное активное сопротивление $R_н$ уменьшается, ток растёт, и это хорошо — увеличивается косинус фи (Р-83). Однако большое промышленное предприятие, на котором работает много асинхронных двигателей, для электростанции не очень приятный потребитель

— у него велика общая индуктивная составляющая нагрузки. Она, как известно, полезного дела не делает, а ток по цепи гоняет (Т-8) и потери в линиях передачи увеличивает (Р-83).

И вот тут на помощь приходят синхронные двигатели — при определённом режиме в них создаётся такой же сдвиг фаз между током и напряжением, какой наблюдается у конденсатора. Это ёмкостное сопротивление синхронных двигателей действует против индуктивного сопротивления асинхронных двигателей и повышает косинус фи. Поэтому на производстве синхронные двигатели стараются использовать везде, где это возможно.



ВК-222. *Зная частоту* ***f*** *переменного тока в антенне в герцах и скорость света* ***c*** *= 300 000 000 метров в секунду, легко подсчитать длину волны в метрах. Для упрощения расчётов можно взять частоту в килогерцах и считать, что* ***c*** *= 300 000 километров в секунду. Во всех случаях длина волны получится в метрах. Если бы у нас был прибор, измеряющий мощность электромагнитной волны, и если бы мы могли двигаться рядом с этой волной с её же скоростью, то, возможно, удалось бы измерить длину волны.*



Р-95. СОЛНЕЧНЫЙ ЛУЧ ПЛЮС ПАРОВАЯ ТУРБИНА. Есть цифра, которая воодушевляет тех, кто занимается солнечной энергетикой — использованием солнечного тепла. Цифра эта называется солнечная постоянная, и называет она мощность излучения, которое приходит от Солнца в район Земли (расстояние 150 миллионов километров) на площадку размером 1 м^2 (квадратный метр), перпендикулярную солнечным лучам. Солнечная постоянная равна 1367 Вт/м^2 — почти полтора киловатта на квадратный метр. Конечно, на самой Земле только в полдень и только в экваториальных районах можно получить близкую солнечную мощность. А если учесть все виды потерь и непременный ночной перерыв, то окажется, что в среднем мы получаем почти в четыре раза меньше — 340 Вт/м^2.

В разных странах, особенно в США, Испании, Израиле, Португалии, в том числе и далеко от экватора, например в Германии, строят солнечные электростанции разного типа, но в основном экспериментальные, поисковые. В их числе несколько станций, где большое количество управляемых автоматами зеркал направляют солнечную энергию на своего рода паровой котёл, и он в итоге снабжает паром турбину с электрогенератором. Сегодня это реально работающая схема, и её повторили уже в нескольких странах. Но специалисты как реальность ближайших лет обдумывают и разрабатывают солнечные аэростатные электростанции, передающие энергию на Землю по кабелю, и мощные орбитальные станции, передающие на Землю энергию острым лучом

радиоволн.

Особенность одного из вариантов двигателей постоянного тока определила путь развития всего электрического транспорта, а именно то, что для него используется не переменный, а постоянный ток. Двигатель постоянного тока — это статор с постоянными магнитами или электромагнитами и ротор, к которому через коллектор подводится постоянное напряжение. Оно же питает электромагниты статора в двигателях средней и большой мощности, причём обмотки электромагнитов, или, иначе, обмотки возбуждения, могут подключаться параллельно ротору или последовательно с ним.

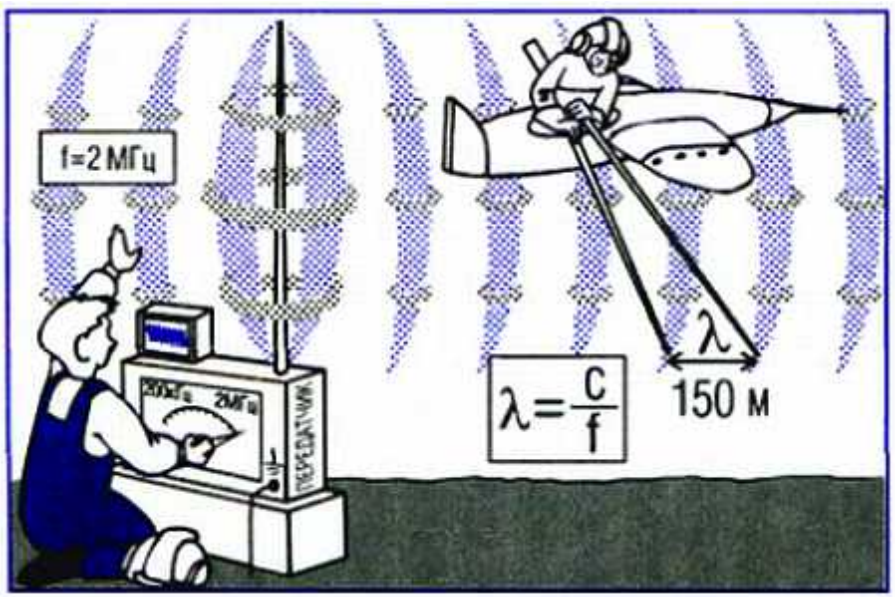
Этот последний вариант даёт замечательный результат: при большой нагрузке обороты ротора минимальные, а крутящий момент двигателя максимальный. С уменьшением нагрузки крутящий момент уменьшается, а обороты нарастают. Именно такой режим и нужен любой транспортной машине. В автомобиле, например, для того чтобы получить такой режим, вводится коробка перемены скоростей. Машина трогается с места или поднимается в гору на первой, на самой низшей скорости — колёса вращаются медленно, но с большой силой. Когда же автомобиль уже разогнался, колёса надо крутить быстрее, а крутящий момент может быть поменьше — водитель (или автомат) переключает коробку скоростей на более высокую передачу.

Электродвигатель постоянного тока с последовательным, или, иначе, с сериесным возбуждением, сам автоматически обеспечивает этот режим, и ради него, ради этого двигателя на всём электрическом транспорте, в частности, в метро, трамвае, электропоездах, невзирая на некоторые дополнительные сложности и неудобства, используют именно постоянный ток. Уже одного этого факта достаточно, чтобы задуматься о разнообразии и, так сказать, индивидуальных особенностях разных типов электрических двигателей.

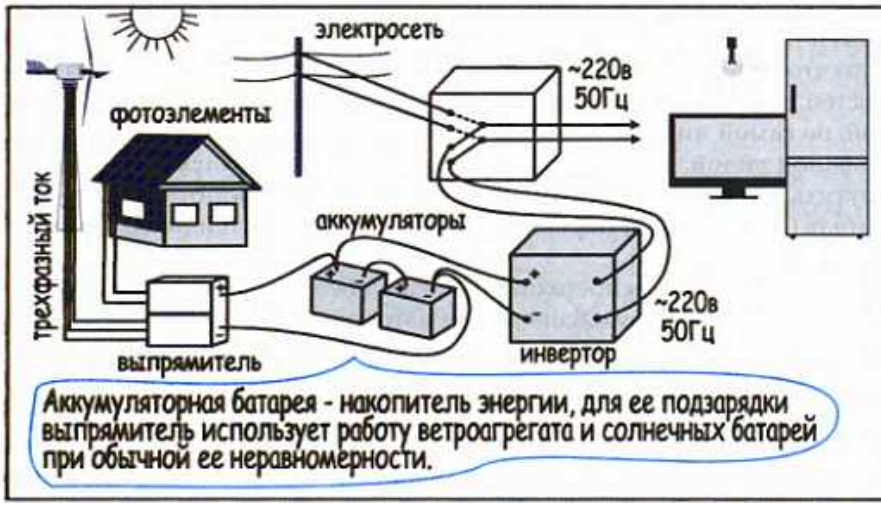
Т-182. **Да будет свет!** К числу электрических профессий, сильно изменивших жизнь человека, конечно же, нужно отнести электрическое освещение. Всего лишь сто с небольшим лет назад неизбежными казались длинные вечера со свечой или керосиновой лампой и кромешная тьма на городских окраинах, а тем более на деревенских улицах. Сравните это с нынешним изобилием чистого и яркого электрического света, фактически продлевающего наш день.

Об уместности слова «изобилие» косвенно говорит то, что

10 % всей производимой электроэнергии расходуется на освещение или, по строгому определению, на создание световых условий для труда и отдыха. Главный работник здесь всё ещё электрическая лампа накаливания, в народе ласково именуемая лампочкой. О ней, вроде бы, и рассказывать нечего — устройство простое, производство полностью автоматизировано и ежегодно поставляет жителям планеты 30–40 миллиардов лампочек. И всё же об электрической лампочке стоит сказать несколько слов, сделав короткое и важное предисловие.



ВК-223. *Увеличивая частоту радиопередатчика в 10 раз, мы обнаружили бы те же 10 раз более короткую электромагнитную волну.*



Р-96. СОЛНЦЕ И ВЕТЕР ДЛЯ ДАЧНОГО ДОМА. Это часто бывает в нашей повседневной жизни — новое дело, в котором что-то можно сделать своими руками, порождает мощную волну любительства. Так, стремление своими руками построить простейший приёмник стало началом радиолюбительства для многих тысяч будущих великих инженеров. Сегодня большой интерес молодежь проявляет к бесплатному электричеству, к тому, чтобы в своем деревенском или дачном доме иметь независимый источник электроэнергии. Например, ветрогенератор или солнечный генератор, а ещё лучше и тот и другой. Если с центральным электроснабжением не всё в порядке, то об этом действительно стоит подумать.

Для того чтобы серьёзно заняться собственным электроснабжением, нужно обязательно добыть специальное пособие, где обо всём рассказано подробно и конкретно. Ну а общие сведения о предстоящем деле мы всё же представим, как говорится, для кругозора. На этом рисунке в упрощённом виде показано то, что в итоге должно быть сделано. Ветер вращает лопасти ветрогенератора (ВГ), и на его выходе появляется напряжение. Аналогично Солнце освещает фотоэлементы солнечного генератора (СГ), и на его выходе тоже появляется напряжение. Оба генератора ВГ и СГ как источники энергии имеют один и тот же недостаток — выходное напряжение у них непредсказуемо меняется. Усилился ветер — и напряжение ВГ резко выросло,

набежали тучи — и напряжение СГ резко упало, не говоря уже о том, что ночью оно всегда равно нулю. Чтобы из-за этих изменений не менялось напряжение нашей внутренней сети, вводится аккумуляторная батарея. Круглые сутки ВГ и СГ заряжают её разным током, какой в данный момент есть, таким и заряжают. А аккумуляторы всегда выдают одинаковое постоянное напряжение, которое мы в дальнейшем превратим в неизменное сетевое. Сделает это один из самых дорогих блоков всей системы — инвертор. Он получит постоянное напряжение от аккумуляторов и с помощью своего внутреннего генератора превратит его в стандартное переменное напряжение 220 вольт, 50 герц.

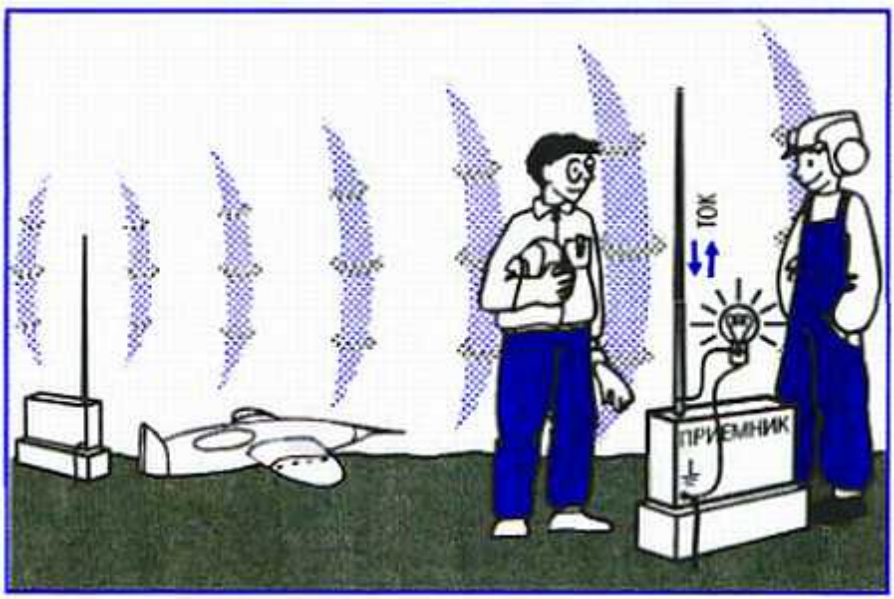
Свет, как уже не раз говорилось, это свободно несущиеся в пространстве электромагнитные волны, то есть сгустки электрических и магнитных полей, которые следуют друг за другом, подобно гребням морских волн. Но только у видимого нами света длина волны ничтожно малая, расстояние между соседними электромагнитными «гребнями» меньше микрона. Напомним, что микрон — это тысячная доля миллиметра, то есть у светового луча на участке длиной миллиметр можно насчитать более тысячи электромагнитных «гребней».

Наш мир наполнен самыми разными электромагнитными излучениями — от радиоволн, у которых длина волны измеряется километрами, до гамма-лучей, у которых длина волны ещё в миллиарды раз меньше, чем у видимого света. Мы никак не чувствуем, не воспринимаем все эти электромагнитные волны, кроме одной очень небольшой их части с длиной волны примерно от 0,4 до 0,8 микрона (400–800 нанометров). Именно этот очень небольшой участок огромного электромагнитного спектра носит имя «видимый свет», и именно его с помощью сложных электрохимических процессов регистрируют живые организмы в системе, которая именуется зрение.

Почему живая природа выбрала именно этот участок спектра? Почему мы видим только электромагнитные волны длиной от 0,4 до 0,8 микрона? Да потому, что Солнце, которое генерирует и отправляет в пространство практически все электромагнитные волны, от радиоволн до гамма-лучей, с особой силой излучает в световом диапазоне — излучает электромагнитные волны длиной от 0,4 до 0,8 микрона. И именно в этих сравнительно сильных солнечных лучах легче всего видеть окружающий мир. А отсюда вывод: создатели искусственного света, по сути дела, должны

имитировать Солнце, должны применять приборы, которые излучают именно в световом участке электромагнитного спектра.

В электрической лампочке (Р-79) свет излучает нить из вольфрама (или его сплавов), нагретая проходящим по ней током до примерно 2–3 тысяч градусов. Когда-то, чтобы нить не сгорела при столь высокой температуре, в баллоне лампы создавали вакуум и, откачивая воздух, удаляли кислород. Сейчас баллон наполняют инертным газом, например криптоном, и благодаря этому у лампочки увеличивается срок службы — криптон препятствует испарению металла, которое в итоге как раз и выводит лампу из строя.

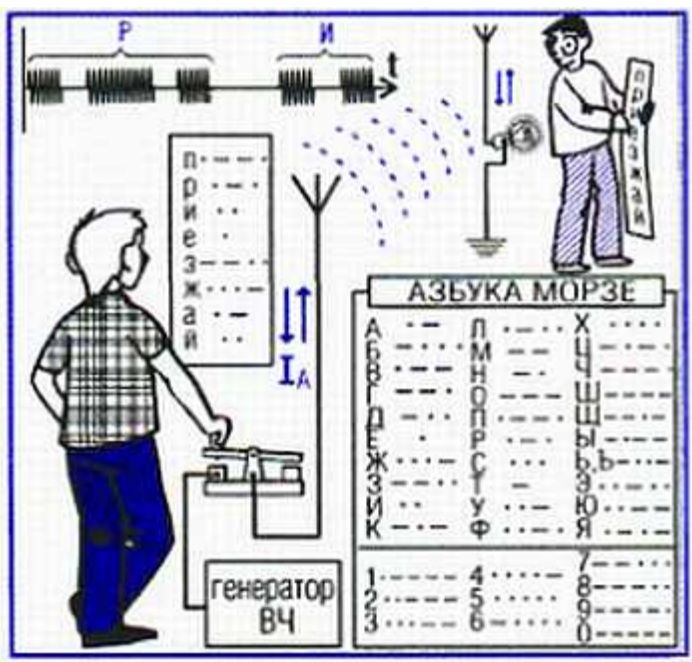


ВК-224. *Полёт завершён. О чём говорят молодые авиаторы? Наверное, о том, что современная авиация насыщена электрическими системами и радиоэлектроникой.*

Если при изготовлении вольфрамовой нити какой-то её участок оказался чуть тоньше, то с него металл испаряется особенно интенсивно по двум причинам. Во-первых, у этого участка меньше поверхность теплоотдачи, и во-вторых, у него чуть больше сопротивление, а значит, выше напряжение и выделяемая на этом участке электрическая мощность. В итоге тонкий участок нагревается сильнее, быстрее теряет массу, и именно в этом месте нить со временем перегорает. Из-за всего этого очень опасно подавать на лампочку повышенное напряжение — если превысить его на 10 %, то время жизни

лампочки сократится в 5 раз.

Важная характеристика электрической лампочки — светоотдача. Это световой поток, который в нормальном её режиме создаёт каждый ватт электрической мощности. Единица светового потока — люмен, сокращённо *лм* (от латинского слова люмен — свет), очень приближённо его эквивалентом можно считать световой поток от небольшой свечки: когда-то единица силы света называлась свеча. У хороших современных лампочек светоотдача составляет 1 лм/Вт, у некоторых типов 2 лм/Вт. Для особых случаев, например для недолгой фотосъёмки, выпускают лампы-перекалки, в них температура повышена до 3400 градусов, светоотдача возрастает до 10 лм/Вт, но срок службы небольшой. Очень высокую светоотдачу при немалом сроке службы имеют пока сравнительно дорогие галогеновые лампы. Их баллон заполнен инертным газом ксеноном с примесью соединений водорода и какого-либо галогена (фтор, хлор, йод, бром), и благодаря этому на поверхности вольфрама создаётся тонкий защитный слой, который препятствует испарению металла и позволяет поднять его температуру. При температуре плавления вольфрама светоотдача превысила бы 50 лм/Вт.



ВК-225. *В рассказе о появлении телеграфа (ВК-209) была упомянута азбука Морзе, и нужно, пожалуй, привести её полностью, по крайней мере, для русского алфавита. Кстати, в*

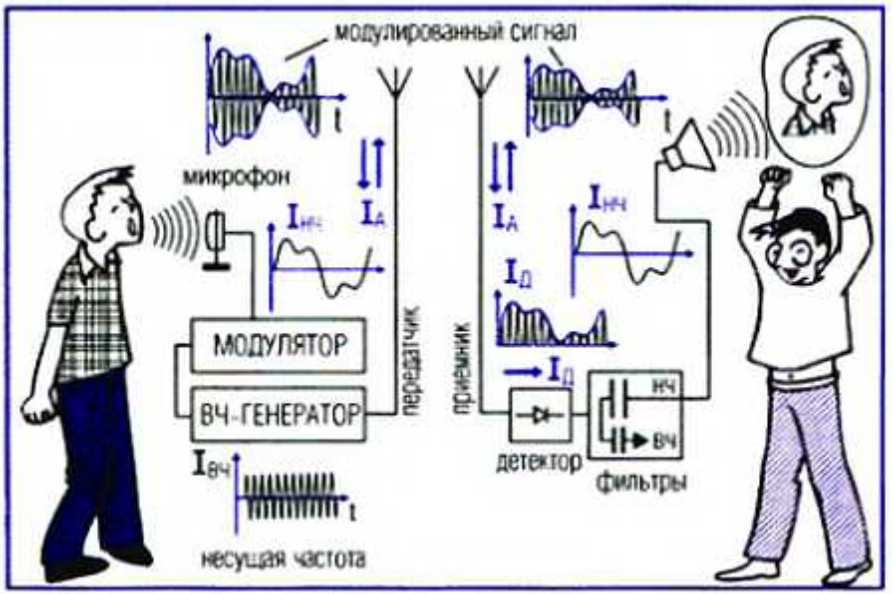
этой азбуке многие латинские буквы, в частности A, B, W, G, D, E, Z, I, K, L, M, N, O, P, R, S, T, U, F, C, имеют ту же кодировку, что и их русские аналоги. Существуют простые программы и схемы, преобразующие обычный буквенный текст в коды азбуки Морзе. Но многие радиолюбители просто знают её и используют, общаясь с любителями других континентов.

Уже много лет на простую и привычную электрическую лампочку накаливания успешно наступают световые приборы с иным механизмом излучения света (Р-79), мы все хорошо их знаем под именем люминесцентные лампы, или, по простому, лампы дневного света.

Эти лампы были изобретены около 100 лет назад, примерно через 20–30 лет в виде длинных белых трубок они начали широко применяться, и особо широко лет 20 назад, когда появились небольшие лампы дневного света с цоколем, как у обычной лампочки, — их можно просто ввинтить в старый патрон. Как выяснилось, привыкание к этим новым осветительным приборам, несмотря на их экономичность, происходит довольно медленно, и сейчас может совсем остановиться в связи с появлением новых электрических осветителей с полупроводниковыми диодами.

Уже хорошо знакомая всем белая светящаяся трубка лампы дневного света по процессам, которые в ней происходят, намного сложней и интересней обычной лампочки. Прежде всего, внутри трубки между двумя электродами, находящимися в противоположных её концах, создаётся тлеющий электрический разряд, его поддерживает газ низкого давления, содержащий пары ртути. В результате в трубке появляется невидимое ультрафиолетовое излучение, которое, в свою очередь, заставляет светиться люминофор — белое вещество, покрывающее трубку изнутри. В зависимости от состава люминофора у него могут быть разные цвета и оттенки свечения, что отражено в названии лампы. Так, буквы БК означают белый цвет излучаемого света, АД — дневной свет, ЛТБ — тёплый оттенок, ЛДЦ и ЛДЦЦ — освещение с улучшенной цветопередачей, ЛГ — голубой, ЛЗ — зелёный, ЛР — розовый свет и так далее. Каждая люминесцентная лампа имеет ряд вспомогательных элементов, управляющих режимом её включения и продолжительной работы. Конструкторы сделали так, что в большинстве моделей пользователь не касается этого оборудования, даже в небольших моделях, заменяющих обыкновенную лампочку, оно спрятано в цоколь лампы. Одно из достоинств ламп дневного света, в том числе и небольших, они создают ту же освещённость, что и обычные лампочки накаливания, но расходуют на это примерно в

5 раз меньшую электрическую мощность. Для отдельной квартиры в этом может быть и не столь большая экономия по абсолютной величине, но для города — огромная.



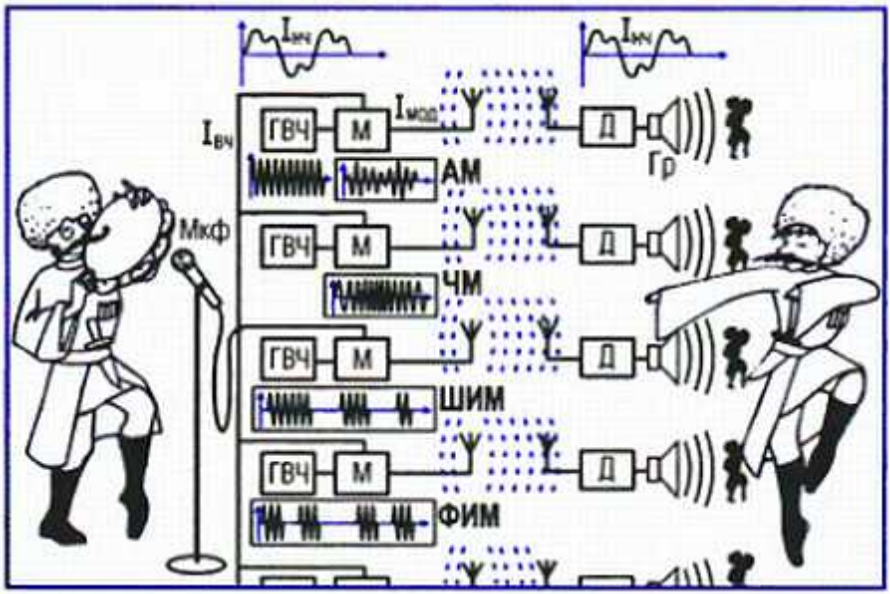
ВК-226. *Эта упрощённая схема поясняет, как общаются по радиоканалу не с помощью телеграфной азбуки, а с помощью голосовой или, иначе, телефонной связи. Чтобы передатчик переносил речь, его высокочастотный ток* $I_{вч}$ *модулируют (меняют амплитуду) электрической копией звука — током* $I_{нч}$ *из микрофона. Модулированные радиоволны приходят в приёмник, и созданный ими ток пропускают через детектор. Он создаёт сигнал, в спектре которого есть низкочастотная составляющая — копия тока* $I_{нч}$.

В последнее время и у люминесцентных ламп, несмотря на все их достоинства, появились, как уже говорилось, серьёзные конкуренты — полупроводниковые светодиоды. Подробно о диодах будет рассказано позже, а сейчас они непременно должны быть в нашем рассказе, и нужно, забегая вперёд, сказать о них несколько слов.

Представим себе диод как небольшой полупроводниковый кристаллик, который с помощью двух примесей разделили на две особые зоны (греческая приставка ди означает двойной, отсюда и слово диод). Одна из этих двух зон называется зона *n*, или катод, со свободными отрицательными зарядами (электроны) и вторая зона *p*, или анод, с особым типом свободных положительных

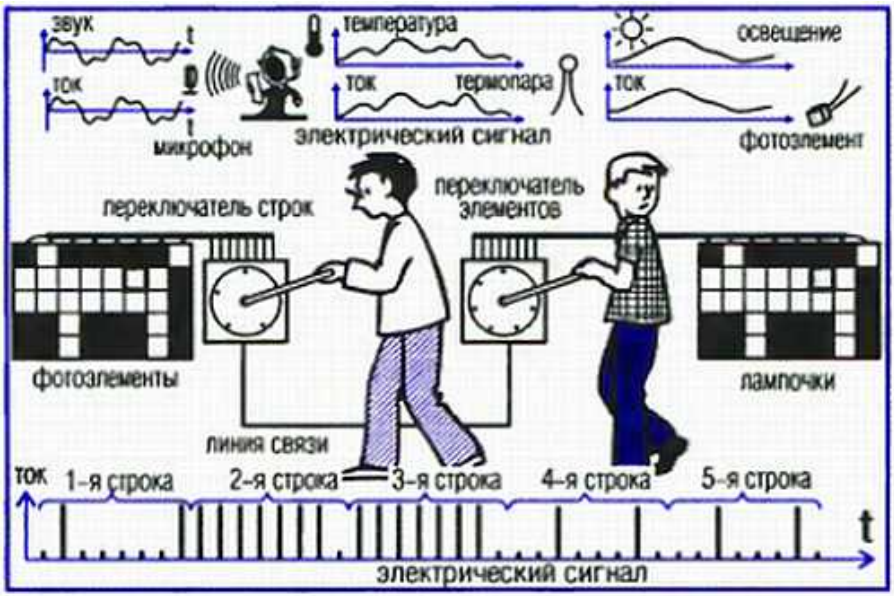
зарядов (положительные ионы) по имени дырки. Теперь подведём к диоду питающее напряжение, например, подключим его к гальваническому элементу (Р-98). Если «плюс» этого элемента подключить к катоду, а «минус» к аноду, то к ним оттянутся свободные заряды электроны и дырки, и никакого тока в диоде не будет. Или, скажем более строго, обратный ток через диод будет равен нулю.

Если же «плюс» гальванического элемента подключить к аноду, а «минус» к катоду, то через диод пойдёт довольно большой прямой ток: свободные положительные ионы (дырки) *n* электроны устремятся к середине кристалла, и там в довольно узкой области по имени *pn*-переход (буква *p*, разумеется, от слова positive, а и от слова negative) они объединятся в нейтральные атомы. При этом из других нейтральных атомов образуются дырки (свободные положительные ионы) и электроны. Можно так подобрать вещество кристалла и применяемые примеси, что прямой ток через диод приведёт к излучению света из области *pn*-перехода. Более того, много лет исследуя излучающие свет диоды, физики создали такие их образцы, которые излучают свет со значительно меньшим расходом электрической мощности, чем у ряда люминесцентных ламп и тем более у обычных лампочек накаливания. В наше время широко выпускаются и продаются, а также применяются для освещения служебных и жилых помещений светодиоды, главным образом объединённые в группы, снабжённые пластиковыми рефлекторами и линзами, а часто и стандартным цоколем, облегчающим быструю замену ламп накаливания на полупроводниковый источник света.



ВК-227. *В прошлом примере был выбран самый простой вид модуляции — амплитудная, сокращённо АМ. Но есть и другие способы нагружать ВЧ-сигнал, другие виды модуляции. Например, частотная (ЧМ), когда НЧ-сигнал меняет частоту передатчика. Или когда при передаче радиоимпульсов меняют их ширину (ШИМ) или фазу (ФИМ). При этих видах модуляции передатчик занимает в эфире более широкую полосу частот, и применять их можно только на очень высоких частотах.*

Т-183. **Тепло согревающее, тепло соединяющее.** Особо сильный источник света — электрическая дута (Р-79), её используют в мощных прожекторах и некоторых осветительных приборах для киносъёмки. Если сдвинуть два угольных электрода и пропустить по ним ток, то в месте контакта электродов будет выделяться значительное тепло. А если электроды несколько раздвинуть, между ними появится чрезвычайно яркая изогнутая объёмная полоска — электрическая дута. Это область, в которой между электродами протекает очень сильный ионный ток, температура достигает 3–4 тысяч градусов, частицы перестраиваются, сталкиваются, излучая широкий спектр электромагнитных волн, в том числе и мощный свет.

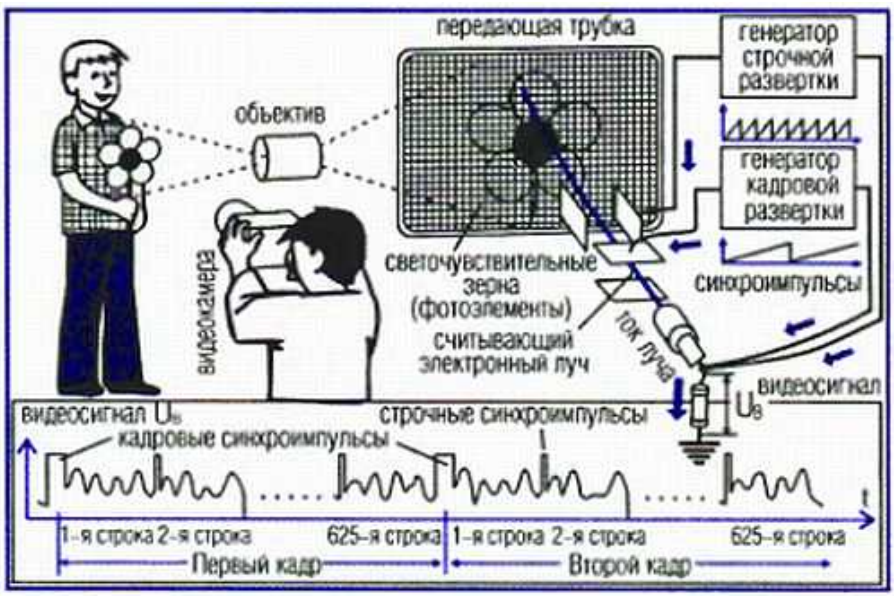


ВК-228. *Пора отдохнуть от несложного дела — передачи голосов по радио. Нас ждут дела более сложные — передача по радио картинки. В принципе это можно сделать так: разбиваем картинку на небольшие участки и поочерёдно передаём сообщения об их освещённости. Используя этот простой метод, нам нужно передать и принять картинку большую, чёткую, подвижную, цветную и со звуком. И чтобы приёмник мог принимать сотни две других картинок, в том числе из других городов и континентов.*

Задолго до появления электрической лампочки дуга использовалась в первых электроосветительных приборах, а в начале прошлого века она служила источником высокочастотных токов в радиопередатчиках. Сегодня главная профессия электрической дуги — электросварка, но здесь она уже выступает не как источник света, а как источник тепла.

Использовать электроэнергию для нагревания чего-либо очень невыгодно. Сначала мы сжигали топливо и с немалыми потерями добывали электричество, затем его гнали по проводам, несколько раз меняли напряжение, и всё это для того, чтобы опять превратить электричество в тепло, потеряв в итоге 70–80 % исходных калорий. Однако эту суровую арифметику нередко обесценивает такой существенный аргумент, как удобство. Действительно, не разжигать же керосинку, чтобы сварить пару чашек кофе, и нет смысла сооружать печку, чтобы два-три раза в прохладные дни слегка подогреть воздух в домике на садовом участке.

Тепловое действие тока используется не только в маломощных домашних приборах, но также в лабораторных и даже в промышленных установках, где у электронагрева нет конкурентов или где его достоинства перевешивают значительный расход энергии. Так, в электропечах, в том числе мощностью в сотни и тысячи киловатт, нагревают трубы, проволоку, прутки и иные металлические заготовки для последующей их закалки или пластической деформации, например, для вытяжки или ковки. Иногда, чтобы нагреть заготовку, с помощью понижающего трансформатора непосредственно по ней пропускают очень большой ток при низком напряжении.



ВК-229. *Первая задача — создать электрическое описание (сигнал) большого числа точек картинки, в российском стандарте их примерно полмиллиона. Это повторяют 25 раз в секунду, чтобы, как в кино, передавались движения. Электрическую копию такой картинки создаёт передающая ТВ-камера. Экран её трубки изнутри покрыт светочувствительным веществом, и электронный луч, оббегая его, снимает напряжение с освещённых участков. Двигают луч генераторы горизонтальной и вертикальной развёртки.*

Для выплавки особых сортов стали существуют малые (на 0,5-25 тонн металла) и большие (более 100 тонн) дуговые печи, где тепло выделяет мощная электрическая дуга между двумя

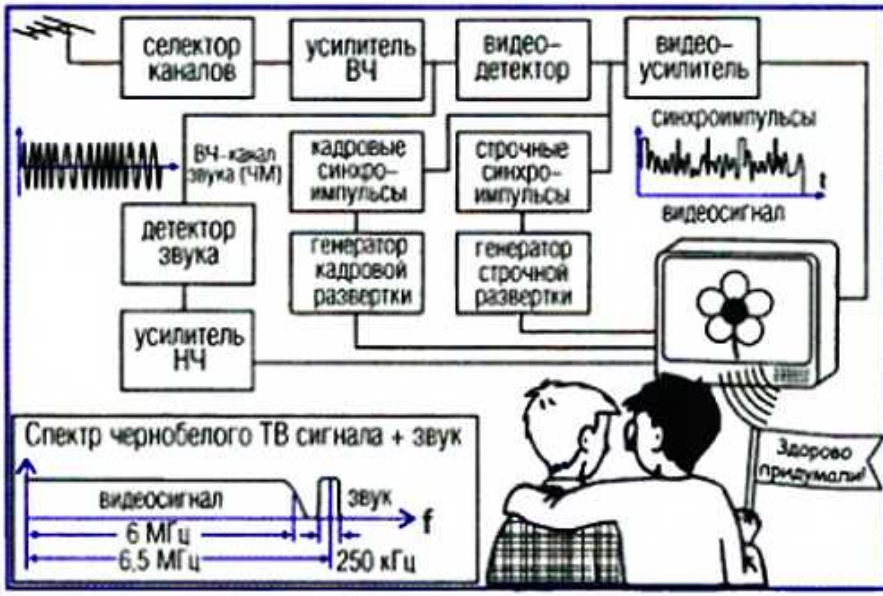
крупными угольными электродами или чаще между электродами и расплавленным металлом. Плавка в таких печах может длиться несколько часов, некоторые специальные сорта стали выплавляют в вакуумных печах — дуговых или индукционных.

Установки для индукционного нагрева напоминают трансформатор, его «вторичная обмотка» — сам нагреваемый металл или металлическая заготовка. В печах такого типа производят плавку чёрных и цветных металлов, разогрев деталей для их последующей сварки или пайки. Используя токи высокой частоты, можно за счёт скин-эффекта нагреть лишь тонкий поверхностный слой металла и осуществить поверхностную закалку, что очень ценно для многих деталей машин (Р-80).

Самая, пожалуй, известная технология, основанная на электрическом нагреве, — это сварка цветных и особенно чёрных металлов. Сегодня без сварки не могут обойтись ни строители домов, ни создатели автомобилей, речных и морских судов, космических аппаратов и, конечно, газопроводных дел мастера. При дуговой сварке электродом служит одна из свариваемых деталей, а второй электрод — тонкий стальной стержень с сероватым покрытием, в котором содержатся присадки для расплавленного металла. Сварщик создаёт дугу между этим электродом и деталью, дуга плавит металл, который, быстро застывая, создаёт прочный сварной шов. При электросварке ток в дуге лежит в пределах от 100 до 1200 ампер, причём токовый режим может резко меняться, и это предъявляет особые требования к понижающему сварочному трансформатору.

В машиностроении, например при сборке автомобильного кузова, используется контактная сварка, главным образом точечная. Она может выполняться примерно так: листовые детали автомобильного капота или крыла с помощью вспомогательных приспособлений плотно сжимают, к точкам сварки подводят электроды и пропускают через них мощный импульс тока; металл в этих точках плавится и сваривается. А иногда для точечной сварки робот двигает электрод вдоль указанной ему линии или катит вдоль неё электрод-ролик, при этом, подобно пулемётной очереди, появляются импульсы тока и формируют точки сварки. Многие виды сварки производят острым и чрезвычайно горячим лазерным лучом, также созданным за счёт электрической энергии.

Можно было бы назвать немало других профессий электричества нагревающего, но уже приведённое выше короткое их перечисление подтверждает, что теплота, полученная из электричества, работает на нас не только в кофеварке и электроутюге.

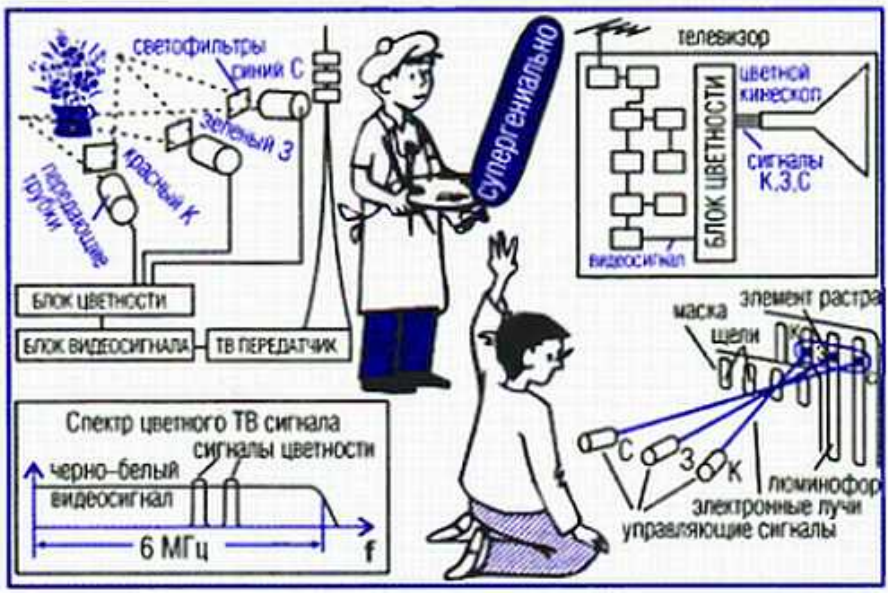


ВК-230. *Посмотрим теперь, что происходит в приёмнике, который все называют телевизором. Уже ясно, что, используя принятый сигнал, его трубка по имени «кинескоп» рисует принятую картинку на своём экране. Упрощённая схема напоминает, что особые меры приняты для того, чтобы картинка не дрожала и не прыгала. Пришедшие из телецентра синхронизующие сигналы выделены и направлены в местные генераторы развёртки для соблюдения абсолютного порядка при воспроизведении картинки.*

Т-184. **Электричество помогает электричеству**. В производстве, распределении и использовании электрической энергии участвует много вспомогательных электрических приборов. Неприметные со стороны, они решают очень важные задачи, например, собирают информацию о работе электрических систем, по указанию диспетчера или автоматически меняют режим электрических машин и аппаратов, защищают их от опасных перегрузок, подают предупреждающие аварийные сигналы, включают, выключают или переключают электрические сети и машины, в том числе дистанционно — с пульта управления.

На первый взгляд может показаться, что какие-то из названных операций не заслуживают серьёзного внимания: что нового можно, например, узнать о давно всем знакомом выключателе? Вместе с тем специальный выключатель — незаменимый работник электрической команды, в сетях, где

циркулируют мегаватты мощности и действуют напряжения в десятки и даже в сотни тысяч вольт. Это непростой аппарат, он совсем не похож на простенькие выключатели на стенах вашей квартиры. Но даже в этих простейших представителях коммутирующей, то есть переключающей, техники можно заметить общие для неё проблемы.



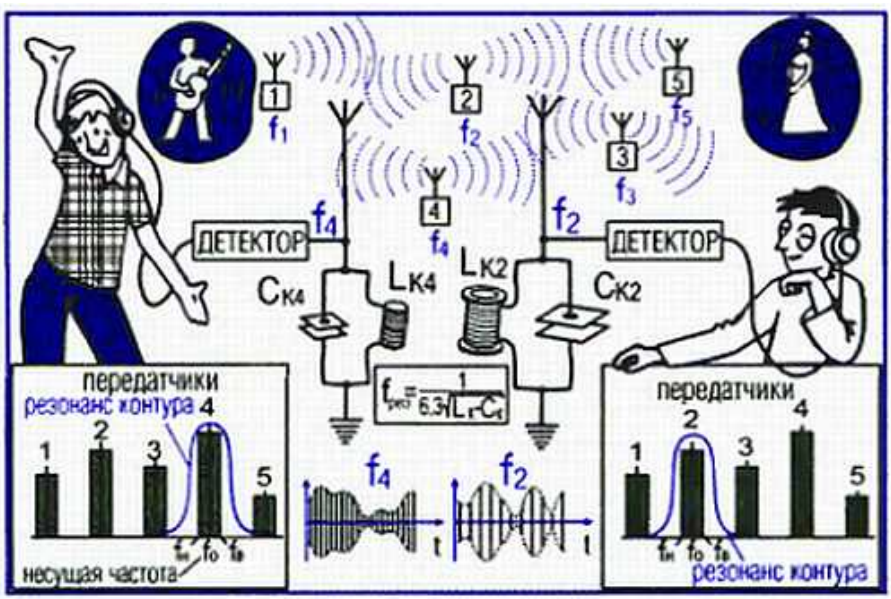
ВК-231. *В системе передачи цвета многое изобретено и придумано, его вполне хватило бы, чтобы всех жителей страны сделать почётными академиками. Сейчас для цветного ТВ не нужны три картинки, как это было раньше. Сигналы цветности незаметно втиснуты в основной сигнал, и компьютер телевизора превращает их в 3 цветные картинки. А рисуют их идущие рядом три электронных луча, пройдя через щель перед самым экраном, каждый из них попадает на свою синюю, зелёную и красную светящуюся точку.*

У любого выключателя при любом включении-выключении слышится лёгкий щелчок, и это не музыкальный привет от шутника конструктора. Щелчок говорит о том, что в выключателе срабатывают пружины, они нужны для того, чтобы ускорить процесс замыкания или разъединения контактов, а при замыкании плотно сжать их. Если затянуть процесс переключения или недостаточно плотно сжать контакты, то в какой-то момент между ними может возникнуть электрическая дуга, контакты будут постепенно подгорать, из-за этого будет расти

сопротивление контактирующего участка, со временем он начнёт сильно нагреваться со всеми вытекающими неприятными последствиями. Так что никакой выключатель не обходится без пружин, сближающих и сжимающих контакты. Их срабатывание особенно чувствуешь в промышленных пускателях с двумя кнопками — «Пуск» и «Стоп».

Серьёзные меры приходится принимать для гашения дуги в сильноточных и высоковольтных выключателях. Иногда, например, с помощью встроенного электромагнита увеличивают изгиб, а значит, длину дуги, увеличивая тем самым её сопротивление и уменьшая ток в ней. В других системах ослабляют дугу, заставляя её проходить через металлическую сетку или щелевые камеры. Их можно встретить и в контроллерах — переключателях на несколько положений, с их помощью, в частности, переключая сопротивления в цепи мощного двигателя, меняют его режим.

А ещё помещают всю переключающую систему в масло, при нагреве оно выделяет газы, которые гасят дугу. При напряжении более 35 киловольт в состав переключателей входят специальные дугогасящие камеры, наполненные газом. Даже в простейшем одноразовом аварийном выключателе тоже принимаются меры для гашения дуги.



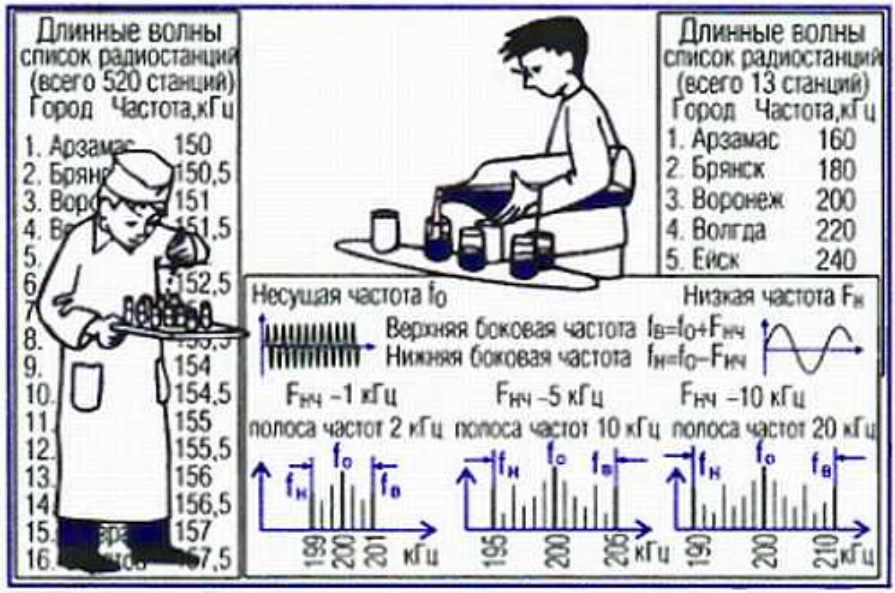
ВК-232. *Ближайшая группа рисунков просто требует повторения одной из предыдущих тем, которую можно назвать так: «частотное разделение каналов связи» (ВК-137). Разные*

станции в одно и то же время принимаются разными приёмниками и не мешают друг другу. Подобное возможно потому, что эти станции работают на разных частотах. Контуры приёмников настроены именно на эти частоты и за счёт резонанса сильно поднимают уровень сигнала принимаемой станции. То есть выделяют её из других.

Во многих случаях коммутация в электрических системах производится дистанционно, и само механическое действие, само перемещение контактов осуществляют с помощью электромагнитов. Самый распространённый переключатель такого типа — электромагнитное реле (Р-49), с его помощью слабый сигнал может включить, выключить или каким-то иным образом переключить значительно более мощные электрические цепи. Своего рода мощные реле — автоматические воздушные выключатели, они могут за сотые и даже тысячные доли секунды отключить электрическую цепь при появлении в ней недопустимого тока. Похожие маломощные автоматы максимального тока используются вместо плавких предохранителей, в частности, на входе электрической сети в квартиру.

В последнее время вместо электромагнитных переключателей всё чаще работают транзисторы и тиристоры, они срабатывают за миллионные доли секунды, в них нет проблемы электрической дуги и вообще нет контактов. Эти ещё не так давно маломощные полупроводниковые транзисторные выключатели уже усилены настолько, что могут переключать токи в десятки ампер и напряжения в тысячи вольт.

В электрическую команду обслуживания электрических систем ещё входят измерительные приборы, но о них нужно сказать особо.



ВК-233. *При амплитудной модуляции боковые частоты, верхняя $f_в$ и нижняя $f_н$, отстоят от основной несущей частоты передатчика f_0 в зависимости от того, какова наибольшая низкая частота $F_{нч}$. Этим же, естественно, определяется и полоса частот, которую радиостанция занимает в эфире. Для ручной (медленной) телеграфной передачи достаточно 0,5 килогерца, для передачи телефонных разговоров — примерно 4 килогерца, ну а дальше полоса становится шире с повышением качества передачи музыки.*

Т-185. **Измерительные приборы рассказывают о невидимом и неуловимом.** Приборы для измерения напряжений, токов и других параметров электрической цепи обычно считают оборудованием вспомогательным, но они не меньше иного основного многое сделали и делают для электричества. Достаточно вспомнить, что эти приборы, рассказывая о невидимых событиях в электрической цепи, помогают проверять расчёты и теории, быстро находить и устранять неисправности, непрерывно контролировать работу машин и аппаратов, предупреждать о каких-либо отклонениях от нормы, не дожидаясь появления дыма.

Кое-что об измерительных приборах уже сообщалось, было сказано, как включаются в цепь вольтметр и амперметр, почему собственное сопротивление вольтметра должно быть как можно больше, амперметра — как можно меньше. Настал момент пояснить, как выглядят и как работают реальные приборы,

которые раньше в нашем рассказе появлялись лишь в виде условных обозначений на схемах и в простейших рисунках.

Самый простой — прибор электромагнитного типа, через его катушку пропускают измеряемый ток, и она, как любой электромагнит, намагничивает и втягивает небольшой железный сердечник. Но втягиванию противодействует пружина, и чем больше измеряемый ток, тем больше втягивающая сила электромагнита, тем в большей мере он преодолевает сопротивление пружины, тем сильнее в катушку втягивается сердечник и дальше отклоняется связанная с ним стрелка. Недостаток прибора — не очень высокие точность и чувствительность, достоинство — он с одинаковым успехом измеряет постоянный и переменный ток: когда направление тока меняется, сердечник тут же перемагничивается и продолжает втягиваться в катушку прибора.

Более точный стрелочный прибор магнитоэлектрического типа, в нём на спиральных пружинках подвешена лёгкая квадратной формы катушка, которую называют рамкой. Рамка находится в поле постоянного магнита, а через пружинки к ней подводится измеряемый ток. Взаимодействуя с полем магнита, магнитное поле рамки старается повернуть её, с рамкой жёстко связана стрелка, по отклонению которой можно судить о величине тока. Основная характеристика прибора — это его чувствительность, то есть ток, который отклоняет стрелку до конца шкалы. У средних приборов это 1–5 миллиампер, у хороших 50-100 или даже 10–20 микроампер. Магнитоэлектрический прибор, в отличие от электромагнитного, измеряет только постоянный ток: если ток меняет направление, то рамка и вместе с ней стрелка отклоняются в обратную сторону, влево от нуля. А при переменном токе стрелка дергалась бы туда-сюда, но из-за инерции она не успевает отклоняться и, подрагивая, стоит на месте. Вместе с тем магнитоэлектрическим прибором можно измерять переменное напряжение, используя простейший полупроводниковый выпрямитель.

Любой из приборов может быть не только амперметром, но и вольтметром: чем больше измеряемое напряжение, тем больший ток идёт через прибор, тем сильнее отклоняется стрелка. Главное, чтобы прибор своим сопротивлением сам не менял режим цепи и не показывал ток или напряжение, которые без него будут совсем иными.

На основе чувствительного магнитоэлектрического прибора (его часто называют гальванометром) строится очень популярный комбинированный прибор авометр, это сокращение от слов амперметр, вольтметр, омметр. Чтобы по общей шкале удобно

было отсчитывать и большие, и малые величины, прибор, как правило, делают многопредельным: переключая добавочные резисторы и шунты, делают так, чтобы стрелку в одном случае полностью отклонял ток, например, 500 мА, а в другом 5 мА. Сопротивление авометр измеряет с помощью внутренней батарейки.

В последние годы с традиционными стрелочными приборами успешно конкурируют цифровые. В них измеряемый ток или напряжение преобразуются в определённый код, который в итоге и высвечивает на экране нужные цифры. Но совсем не обязательно традиционные стрелочные приборы будут вытеснены цифровыми, ведь не вышли же из употребления часы со стрелками с появлением очень точных часов с небольшим цифровым экраном. Иногда особая точность отсчёта не нужна, и стрелочный прибор удобнее — взглянул на положение стрелки и, не задумываясь, сразу чувствуешь суть дела.

Существует большое многообразие измерительных приборов, например, генераторы постоянного тока, измерительные (маломощные) генераторы переменного тока различных частот, приборы для измерения индуктивности катушек или ёмкости конденсаторов, измерители частоты, фазы, амплитуды, напряжённости электрического или магнитного поля, использующие принцип радиолокатора определители места повреждения кабеля и много других приборов.

Об одном из них нельзя не сказать несколько слов — это электронный осциллограф. В одном из режимов его внутренний генератор, воздействуя нарастающим напряжением («пила») на отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки, равномерно продвигает электронный луч и высвечивает на экране ровную горизонтальную линию. Если при этом на другую пару отклоняющих пластин подать какой-нибудь исследуемый сигнал, то он будет отклонять луч вверх-вниз, и на экране появится самый настоящий график сигнала — подробный отчёт о всех его изменениях во времени. В двухлучевом осциллографе можно наблюдать и сравнивать одновременно два сигнала. Осциллограф может работать в нескольких режимах, демонстрируя главную черту всех измерительных приборов: они позволяют реально увидеть невидимый мир электричества.

Глава 18
Бригады прибывают по медному проводу

Коротко познакомившись с основными источниками и потребителями электроэнергии, нельзя считать, что тебе открылась картина современной большой электроэнергетики. В этой картине пока не хватает исключительно важного звена — системы транспортировки и распределения электрической энергии, её доставки от генератора к потребителю. Нажимая на кнопку выключателя настольной лампы, мы, конечно, понимаем, что электричество приходит в наш дом с электростанции, и приходит по проводам. Но большинство пользователей, скорее всего, не знает, как много на этом пути устройств преобразования, переключения и распределения электроэнергии, приборов контроля, управления и защиты, насколько сложным бывает то, что скромно называется «электрическая сеть».

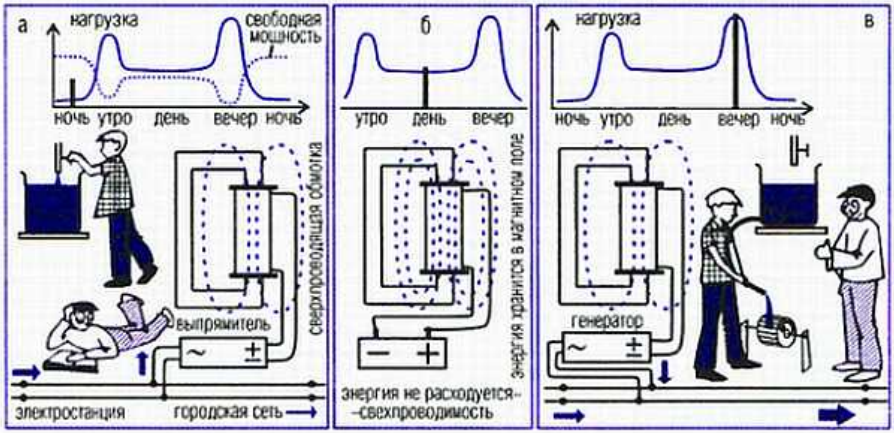
Детальное знакомство с электрическими сетями нужно, разумеется, лишь специалисту, но получить некоторые общие сведения о сетях полезно каждому, кто хочет представить себе, как в нашем мире работает электричество.

Т-186. **Незаменимый вклад реальности.** В конце сороковых годов только что ушедшего столетия, то есть больше, чем шестьдесят лет назад, отечественное электронное телевидение сформировалось как область техники и технологии, готовая служить миллионам. Институты уже готовили инженеров-телевизионщиков, студенты учились по прекрасным новым учебникам телевидения, делали лабораторные работы, защищали курсовые проекты по телевизионным передатчикам, приёмникам, антеннам. Но при этом многие без пяти минут инженеры никогда не видели живого телевизора — телецентры были только в Москве и Ленинграде. В то время автор оканчивал радиотехнический институт далеко от Москвы, сдал курс телевидения и, завершая работу над дипломным проектом по телевизионной тематике, впервые увидел телевизионную картинку (разумеется, чёрно-белую, о цветной в те времена даже

не фантазировали), когда попал в Ленинград на преддипломную практику. Прекрасно понимая, как всё это делается, откуда, куда и какие идут ТВ-сигналы, где и как они обрабатываются, как формируется картинка, я был просто потрясён, когда увидел её живьём, на всю жизнь запомнил этот момент и кадры из венгерского фильма «Мишка-аристократ» на маленьком контрольном телевизоре в аппаратной Опытного ленинградского телецентра. С этой картинкой пришло совсем иное отношение к тому, что я знал о телевидении, — таков незаменимый вклад реальности.

Мы с вами постепенно приблизились к нынешнему крупномасштабному производству электроэнергии. Сначала предстали перед нами его физические основы, например электромагнитная индукция, затем появилась вращающаяся в магнитном поле рамка и, наконец, настоящий генератор. Настал момент сделать последний шаг — взглянуть на настоящую электростанцию. Из нескольких её типов для этого путешествия лучше всего, пожалуй, выбрать (если будет возможность выбирать!) самую распространённую тепловую станцию.

Перед тем как вы отправитесь на экскурсию, вспомните, пожалуйста, то, о чем уже говорила эта книга, с чего мы с вами начали. Ни детальный рисунок, ни подробный комментарий к нему, ни попытки образного описания чего-либо не могут заменить незаменимого — личного впечатления, реального знакомства. Чтобы почувствовать, что такое мир, в котором мы живём, надо своими глазами увидеть некоторые его важные фрагменты, например, большой аэропорт, сельскохозяйственную ферму, госпиталь, автоматизированное производство компьютеров, морской лайнер, научный центр, автомобильный завод, университет, полиграфический комбинат и, конечно, крупную электростанцию, которая даёт силу всему, что работает вокруг нас.



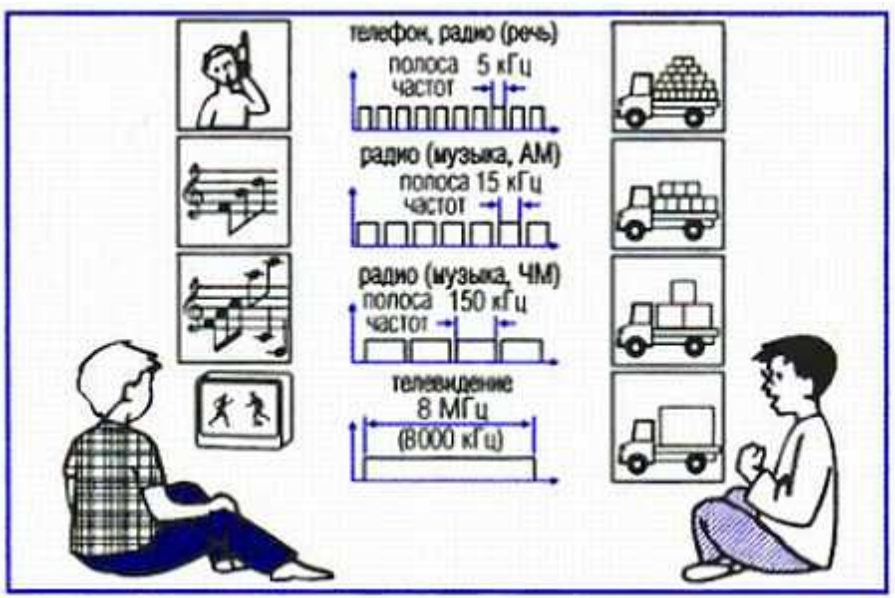
ВК-234. *Человек построил холодильники, хранилища пищевых продуктов. Существуют хранилища металлов, тканей, водохранилища. Но нет у нас больших хранилищ электрической энергии. Пока эту задачу решают батареи конденсаторов большой ёмкости, но они рассчитаны на малые напряжения и пока ещё не очень пригодны для электромобилей. Можно бы хранить энергию в магнитном поле катушек, но для них нужны обмотки без потерь. Так что проблема электрических кладовых остаётся открытой.*

Тепловая электростанция, сокращённо ТЭС, начинается с подъездных железнодорожных путей, по которым ей доставляют топливо, например уголь или мазут. Если ТЭС питается газом, то он, скорее всего, приходит с какой-либо районной распределительной станции по трубопроводам и, конечно, проходит через контрольно-распределительный отдел самой электростанции. Он имеет свои органы управления и контрольные приборы, позволяющие, например, оценить входное давление и поступление газа и его расход. Если будете на станции, потребляющей уголь, обязательно обратите внимание на участок разгрузки вагонов — в большинстве случаев это делается, как принято говорить, без прикосновения человеческой руки (Р-87). Подобные автоматы-разгрузчики уже давно стали своего рода символом освобождения человека от тяжёлого физического труда.

Не пожалейте времени на машинный зал и постарайтесь вспомнить то, что мы с вами уже обсуждали касательно машин, которые вы в нём увидите. Поинтересуйтесь сроком плановых осмотров или остановок той или иной машины для профилактического осмотра и текущего ремонта. Обратите внимание на размеры машин — длина мощного электрогенератора может составлять несколько метров, и

конструкторы, стремясь к повышению мощности, сделали бы его ещё длиннее, если бы не опасность провисания тяжёлого ротора. Это мы с лёгкостью говорим «допустимое провисание», на самом деле решения здесь принимаются на основе многократных испытаний, анализов металла и расчётов с микронной точностью.

Путешествие по машинному залу покажет вам, разумеется, не всё, что участвует в производстве и поставках электроэнергии, на пути к потребителю она проходит через невидимые преобразования в сложном сооружении, которое называется «электрическая сеть». Образно говоря, бригады электрических работников прибывают к нам с электростанции по медному проводу со многими пересадками.



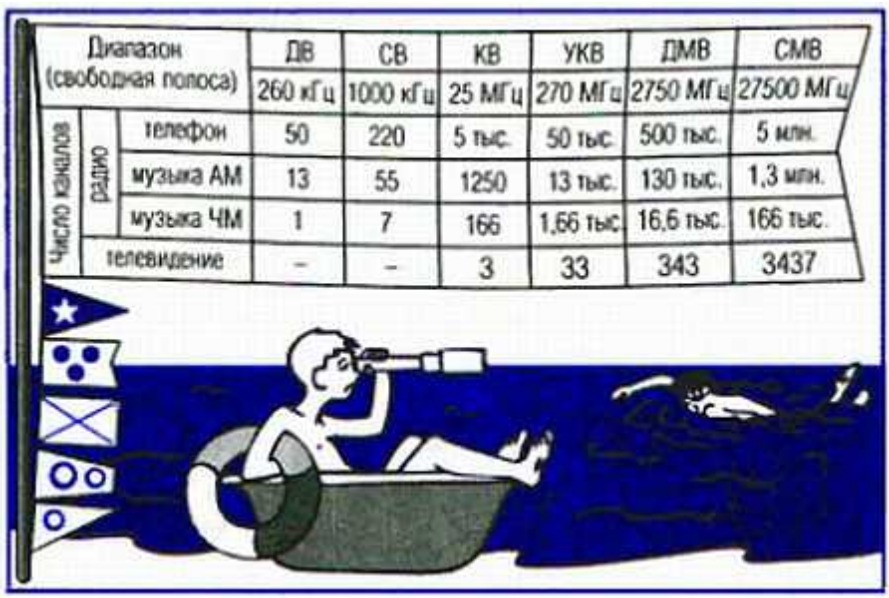
ВК-235. *Полоса частот передатчика — серьёзная проблема для длинных и средних волн, где общая частотная территория невелика. На ультракоротких волнах (УКВ) и в более высокочастотных диапазонах частотные «пространства» велики и легче находят место передатчикам с широкой полосой. В этих диапазонах работают станции с частотной модуляцией и высоким качеством звука и телевизионные передатчики, каждому из которых нужна полоса, достаточная для сотен средневолновых радиостанций.*

Т-187. **Машины тысячекилометровых размеров — электрические сети и системы**. Одна из главных забот при передаче энергии с электростанции к потребителю — снижение

потерь. Даже сейчас, когда для этого, казалось бы, сделано всё возможное, мировые потери при транспортировке электричества составляют примерно 10 % от всей добываемой электрической мощности. Главный способ снижения потерь — это переброска электрической энергии по линиям электропередачи при высоком напряжении и по возможности не очень больших токах (Р-78). Генератор электростанции даёт на выходе 10–15 кВ, для транспортировки больших мощностей на большие расстояния этого недостаточно. Увеличить выходное напряжение генератора нельзя, это недопустимо усложнит его. Поэтому перед отправкой в дальний путь электричество поступает на подстанцию, где мощные трансформаторы повышают напряжение, и по дальним линиям электропередачи (ЛЭП) уже идут десятки и сотни тысяч киловатт при напряжении, увеличенном до многих десятков и сотен тысяч вольт.

Казалось бы, можно и дальше снижать потери, ещё больше увеличивая напряжение, но здесь тоже есть свои ограничения. Например, потери, связанные с коронным разрядом: высокое напряжение ионизирует воздух вокруг проводов, затрачивая на это энергию. Да и само оборудование линий передачи и трансформаторных подстанций с ростом напряжения становится сложнее и дороже. Когда-то даже была такая популярная в народе песня «ЛЭП-500 непростая линия…», в песне говорилось о линии электропередачи ЛЭП-500, то есть передающей электрическую энергию при напряжении 500 киловольт, полмиллиона вольт.

Диапазон (свободная полоса)		ДВ 260 кГц	СВ 1000 кГц	КВ 25 МГц	УКВ 270 МГц	ДМВ 2750 МГц	СМВ 27500 МГц
Число каналов	радио: телефон	50	220	5 тыс.	50 тыс.	500 тыс.	5 млн.
	радио: музыка АМ	13	55	1250	13 тыс.	130 тыс.	1,3 млн.
	радио: музыка ЧМ	1	7	166	1,66 тыс.	16,6 тыс.	166 тыс.
	телевидение	–	–	3	33	343	3437



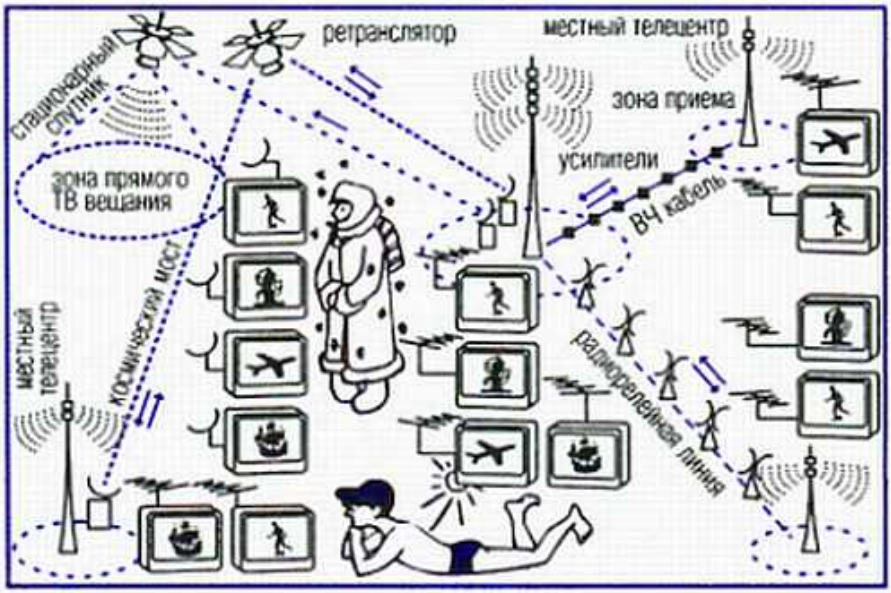
ВК-236. *В таблице цифры, подтверждающие высказывания в подписи к предыдущему рисунку. Диапазоны, начиная с УКВ и с более высокой частотой, имеют серьёзный недостаток: их радиоволны распространяются лишь на расстояние прямой видимости и даже при высоких антеннах больше 30–50 километров обычно не проходят. Но этот недостаток имеет огромное достоинство — станции, расположенные на расстоянии порядка 100 километров, могут работать на одних и тех же частотах, не мешая друг другу.*

Для потребителя, разумеется, нужны сравнительно невысокие напряжения — и машины для них проще, и правила техники безопасности не столь суровы. Поэтому любая высоковольтная линия в конце концов приходит на подстанцию или на цепочку станций, с последней из которых получают энергию жилые районы городов и где трансформаторы понижают высокое напряжение до 380/220 В. Здесь первая цифра 380 В указывает линейное напряжение в трёхфазной системе (звезде), вторая цифра 220 В — это фазовое напряжение (оно всегда в 1,7 раза меньше линейного), которое и поступает в наши квартиры.

Крупные промышленные предприятия получают более высокое напряжение и уже на своих собственных подстанциях понижают его в той или иной степени, одновременно распределяя по многим своим потребителям. Вообще же в России, как и во многих других странах, приняты такие стандарты напряжения: 220 В, 380 В, 660 В, 3 кВ, 6 кВ, 10 кВ, 20 кВ, 35 кВ, 110 кВ, 150 кВ, 220 кВ, 330 кВ, 500 кВ, 750 кВ, 1150 кВ. Пробел между первыми тремя цифрами и остальными должен напомнить, что эти первые три напряжения получает потребитель, причём 660 В только потребитель, связанный с производством. Все последующие напряжения, то есть от 3 до 1150 кВ (от 3 тысяч до 1,115 миллиона вольт), используются для дальней переброски энергии в электрических сетях.

Т-188. **При необходимости электричество можно передавать по обходным путям.** Создатели электрической сети для разных её участков подбирают напряжение с учётом расстояний и нагрузки, нередко повышают или понижают его ступенчато на трансформаторных подстанциях. При этом стараются создать возможность манёвра на случай неполадок на каком-то участке сети или при её профилактическом ремонте. И на подстанции один из двух рабочих трансформаторов, как правило, рассчитан на то, чтобы взять на себя часть чужой нагрузки, обеспечивая энергоснабжение особо важных объектов пострадавшего района. Подстанции, кстати, бывают закрытые, то

есть в помещении, и на открытом воздухе, но, разумеется, защищенные от осадков и нормально работающие в любую непогоду.



ВК-237. *Недостаток высокочастотных диапазонов «ближнего действия» удалось ликвидировать несколькими разными способами. Сегодня сигналы станций, работающих в этих диапазонах, передаются практически на любое расстояние либо по радиорелейным, либо по кабельным линиям с промежуточным усилением сигнала. На огромные расстояния перебрасывают радиосигналы спутники, в том числе на стационарной орбите (высота примерно 36 000 км), то есть всегда висящие над определённым большим регионом.*

Так что электрические сети — это не только провода, по которым электрический ток идёт с электростанции в жилые дома или на заводы. Сеть — это сложная электрическая машина, в которую наряду с линиями электропередачи входят подстанции с мощными трансформаторами, системы контроля, сигнализации, связи, автоматической защиты, переключения силовых линий. В сеть может входить не только много разных потребителей, но и несколько поставщиков энергии, несколько электростанций. Сети имеют разную конфигурацию, часто это кольцо, объединяющее электростанции, или расходящиеся от них радиальные ветви.

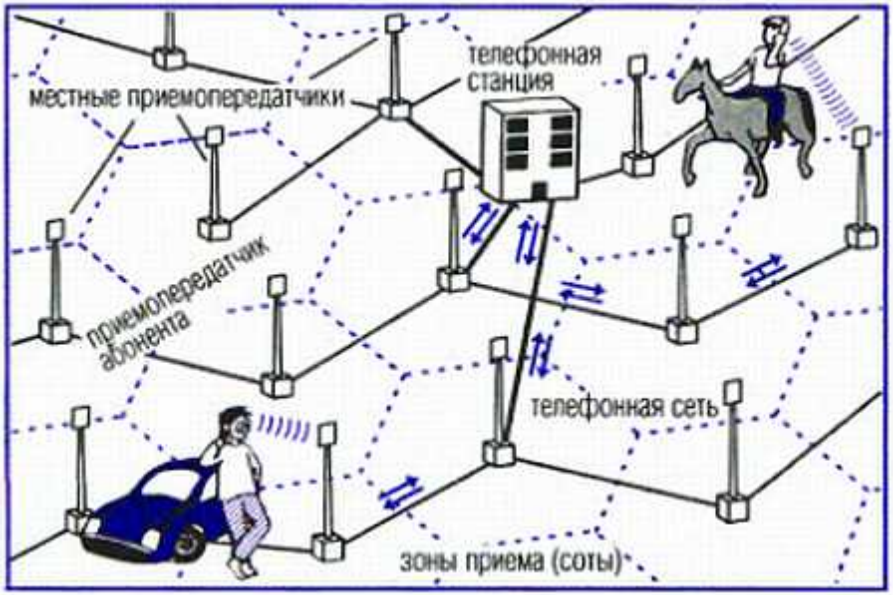
Есть у крупной сети и свой центр управления, где множество приборов на большом контрольном пульте рассказывает

диспетчерам и руководителям системы о режиме разных её участков, групп потребителей, отдельных подстанций. Имеющаяся в системе управления автоматика мгновенно заметит любое опасное изменение режима и подаст сигнал. Прямо с пульта дежурные специалисты могут ввести в систему необходимые команды управления, чтобы поддержать нормальную доставку энергии миллионам людей, использующих её в своей работе и в жизни.

Т-189. **Вращение Земли как элемент технологии.** Крупные сети часто объединяются в ещё более крупные, охватывающие огромный регион, целую страну или даже разные страны и континенты. Такая гигантская сеть носит довольно скромное название — энергетическая система. В Российской Федерации около двадцати крупных энергетических систем: Мосэнерго, Ленэнерго, Уралэнерго, Дальэнерго и другие. И все эти энергетические гиганты объединены в суперсистему, в ЕЭС — Единую энергетическую систему страны. Причём это не только административное и экономическое объединение: Единая энергетическая система — это техническая реальность, позволяющая в трудную минуту подбрасывать на черноморские курорты электроэнергию московских ТЭЦ или помогать уральским энергетикам, посылая им электричество с далёких западных или восточных ГЭС.

Достоинства больших энергетических систем — возможность манёвра, разумное использование мощности электростанций, бережная их эксплуатация за счёт подмены для профилактических и ремонтных работ или реконструкции. Но, кроме того, уже стало повседневной технологией перераспределение нагрузки в больших системах, следуя за вращением Земли. Мощные электростанции, например, постепенно переключаются с восточных районов на более западные по мере того, как максимум утренней или вечерней нагрузки смещается с востока на запад.

В технологию энергоснабжения вошло уже и движение нашей планеты вокруг Солнца — в период весенних паводков с максимальной мощностью работают ГЭС, позволяя снизить расход топлива на ТЭЦ или остановить какие-то их агрегаты для ремонтных работ. Появление больших энергосистем позволило в целом заметно увеличить реальное количество электроэнергии, поставляемой потребителю.



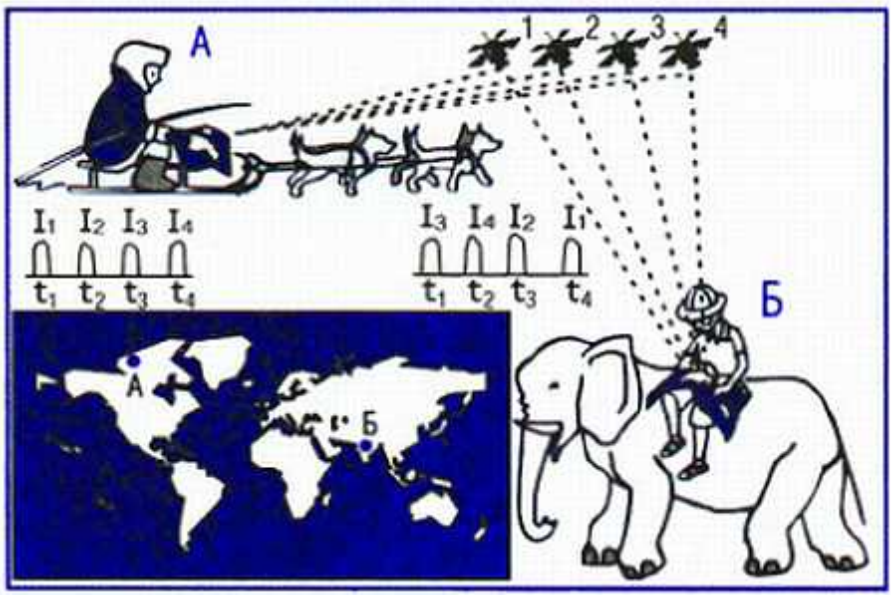
ВК-238. *В диапазоне сантиметровых радиоволн работают приёмопередатчики миниатюрных аппаратов в системе сотовой связи. Через свой аппарат абонент связывается с местной радиостанцией, которая кабелем связана с центральным коммутатором телефонной станцией региона. Он соединит вызывающего с другим абонентом, в том числе и с тем, кто тоже пользуется сотовым аппаратом. В этом случае вызываемый абонент автоматически подключится к коммутатору через приёмопередатчик своего аппарата.*

Т-190. **Непростое электрическое хозяйство потребителя.** Практически во всём мире, согласно законам, договорам, договорённостям и просто здравому смыслу, производитель подводит электроэнергию, так сказать, к воротам потребителя, и дальше тот сам уже занимается её распределением и использованием. На любом промышленном предприятии для этого создаётся мощный электроцех, у которого огромное электрическое хозяйство: внутренние сети, множество разных двигателей и осветительных приборов, специальное оборудование, например, установки для закалки металла или электрические печи, распределительные щиты с контрольными приборами и автоматикой, трансформаторы, внутризаводской электрический транспорт.

Чтобы управиться со всей этой техникой, в электроцехе работает немало специалистов. И на любом крупном предприятии, наряду с такими известными должностями, как

главный конструктор и главный технолог, есть не очень известная широкой публике должность главный энергетик.

Есть организации, которые контролируют потребление электроэнергии в жилых районах городов и в сельских населённых пунктах, но так сложилось, что о своём личном энергетическом хозяйстве в основном думают сами пользователи, зная, какие электрические приборы находятся у них в пользовании и что нужно делать для их исправной и безопасной работы.



ВК-239. *В диапазоне сантиметровых волн (его чаще называют диапазоном СВЧ — сверхвысоких частот) работают спутниковые системы радионавигации. В некоторых приёмник абонента, желающего узнать, где он находится, принимает сигналы с нескольких спутников, электронный блок, обработав полученную информацию, по ней с высокой точностью вычисляет местонахождение приёмника. По картам, извлечённым из памяти, система вычисляет и показывает на экране короткий путь к выбранной цели.*

Глава 19
Электричество личного пользования

По равнению с серьёзными промышленными машинами и установками домашняя электротехника — это просто пустяк, как говорится, шутка гения. Ну что такое, скажем, электропылесос или холодильник в сравнении с многотонными сталеплавильными печами или в сравнении с ускорителем, где особые электромагниты гоняют тонкий, как нитка, пучок ядерных частиц по двадцатикилометровому кольцу вакуумной камеры. Однако из всей огромной армии электрических работников рядового человека наверняка интересуют те приборы и аппараты, которые работают у него в доме. И это вполне понятно — домашняя техника всегда рядом, интерес к её устройству подогревается элементарным любопытством, её, наконец, хочется не испортить своей неграмотностью и, кто знает, может быть, починить своими силами в трудную минуту.

Можно рассказать о всей домашней электротехнике сразу и буквально в двух словах, её электрическая часть не удивляет разнообразием — это в основном электрические нагреватели, моторы и моторчики. И всё же мы посвятили домашней электротехнике отдельную главу, может быть, именно интерес к несложной домашней аппаратуре поможет читателю поднять уровень своей технической культуры, которую мы чаще всего недополучаем в школе и которая в наше время не повредит человеку любой профессии.

Т-191. **Электричество входит в ваш дом.** В жилой дом электричество приходит с расположенной недалеко подстанции, причём в большой дом приходят все три фазы и общий провод — выходная обмотка последнего трансформатора, как правило, соединена звездой. В небольшой дом на садовом участке, скорее всего, прямо со столба или даже с расположенного на столбе трансформатора приходит одна из трёх фаз с напряжением 220 вольт и общий, как его обычно называют, нулевой провод.

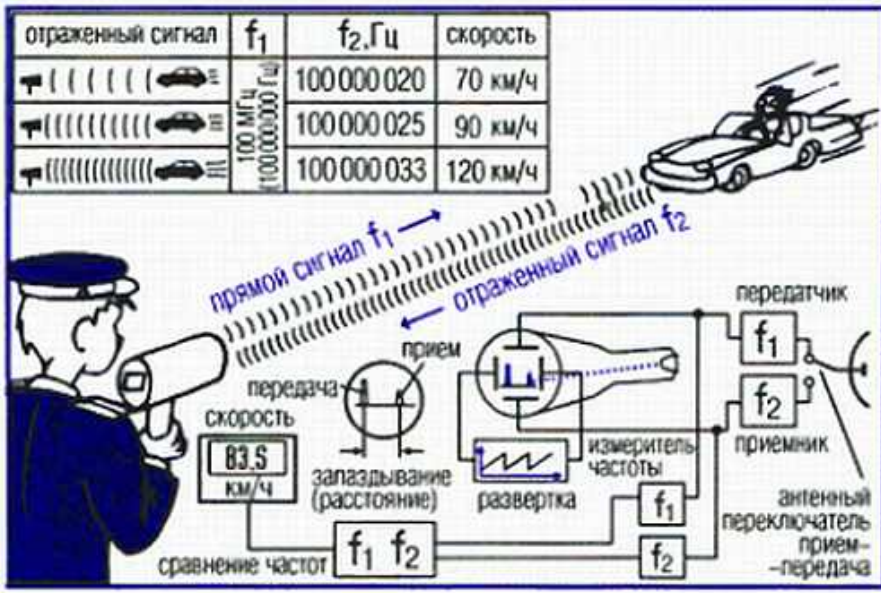
С подстанции обычно напряжение поступает на распределительный щит, единый для всего дома или группы домиков. С этого щита напряжение расходится к разным квартирам. На щите есть общий и групповые выключатели,

аварийные автоматы, а иногда и измерительные приборы. К мощным потребителям, например, к двигателям лифтов, насосов, центрального кондиционера, со щита обычно подводится трёхфазное напряжение.

Основные потребители — жилые квартиры, они делятся на три группы с примерно равным потреблением. Каждая группа с домового щита получает одно из трёх фазовых напряжений, то есть 220 В. Обычно в трёхподъездном доме каждое фазовое напряжение питает один подъезд, в шестиподъездном — два. К квартирам подводятся два провода — фазовый и общий, они входят в квартиру через её небольшой персональный щит (его чаще называют щиток), на котором стоит электросчётчик и несколько плавких предохранителей или автоматов максимального тока. При неприятности в квартире, например при случайном коротком замыкании, она будет мгновенно отключена собственной защитой, и соседи, скорее всего, этого даже и не почувствуют.

В большом жилом массиве есть своя мощная подстанция и, более того, в большом доме тоже может быть своего рода подстанция, разумеется, не очень большая. Она получает по кабелю довольно высокое трёхфазное напряжение, снижает его до необходимых потребителю 220 Вив виде трёх отдельных фаз направляет по квартирам.

В небольшие деревенские или дачные дома однофазное напряжение поступает с местного трёхфазного понижающего трансформатора, который в случае воздушных линий обычно находится на одном из столбов. На трансформатор с подстанции поступает сравнительно высокое напряжение, а с трансформатора парами проводов — фазовый и общий — расходятся три двухпроводные линии по 220 В для трёх групп домиков.



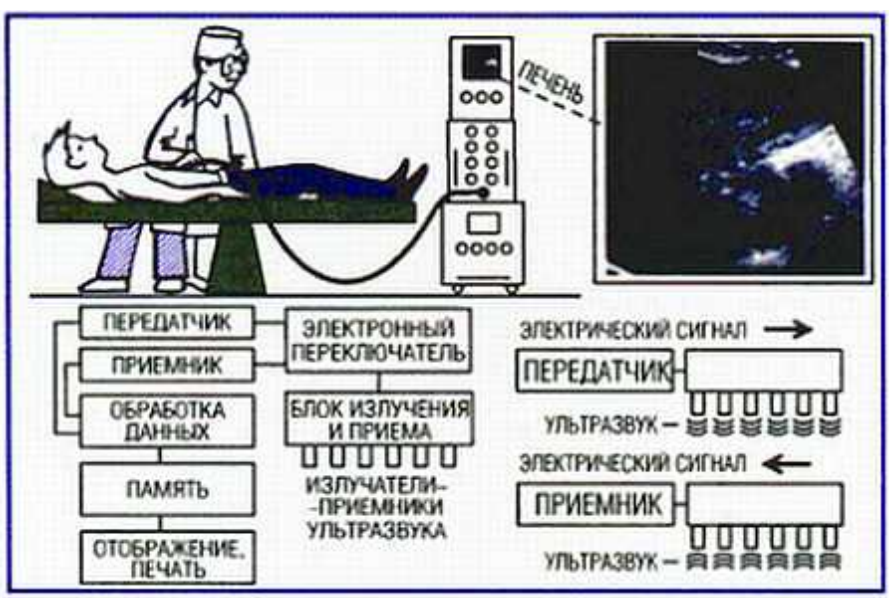
ВК-240. *На сантиметровых волнах работают небольшие радиолокаторы, которыми пользуется дорожный патруль. Такой локатор измеряет скорость приближающегося, а в более поздних моделях и удаляющегося автомобиля. На рисунке условная схема такого прибора, поясняющая принцип его работы. Скорость можно оценить по частоте отражённого сигала: при приближении машины отражённая частота больше посланной, при удалении — меньше (эффект Доплера).*

Все операции с преобразованием напряжения связаны, как всегда, с желанием уменьшить потери и не допустить, чтобы в квартирах заметно снижалось напряжение с ростом нагрузки. Предположим, что большой жилой дом, скажем, стоквартирный, в вечерние часы потребляет мощность порядка 200–300 кВт. По общему кабелю, питающему дом, на участке от подстанции с напряжением 220 В будет протекать ток 1000–1500 А. Если от подстанции к дому передавать электричество с напряжением всего в три раза большим, то есть 660 В, то ток в этой линии снизится до 300–500 А и, соответственно, в девять раз уменьшатся потери в ней.

В современных больших домах личный квартирный щиток стоит уже не в самой квартире, а вместе со щитками других квартир в специальной нише на лестничной площадке. Там же находятся основные предохранители каждой квартиры и её счетчик. Он, как всегда, измеряет потребляемую мощность, но делает это не одноразово, а непрерывно. Как известно, чтобы

узнать потребляемую мощность *P*, достаточно измерить напряжение *U* и ток *I*, а затем перемножить их, поскольку $\mathbf{P = U \cdot I}$. Сделал два измерения, перемножил две цифры и забыл об этом до следующего раза. Счётчик же производит измерение мощности непрерывно и вращает тонкий алюминиевый диск: чем больше потребляемая мощность, тем быстрее он вращается. Диск связан с простеньким цифровым индикатором, который показывает суммарную электрическую энергию, которая прошла через счётчик. В какое-то время потребляемая мощность была побольше, в какое-то время поменьше, но счётчику это безразлично (Т-8), он показывает конечный результат, общую работу, выполненную домашним электричеством, общую энергию, полученную из сети.

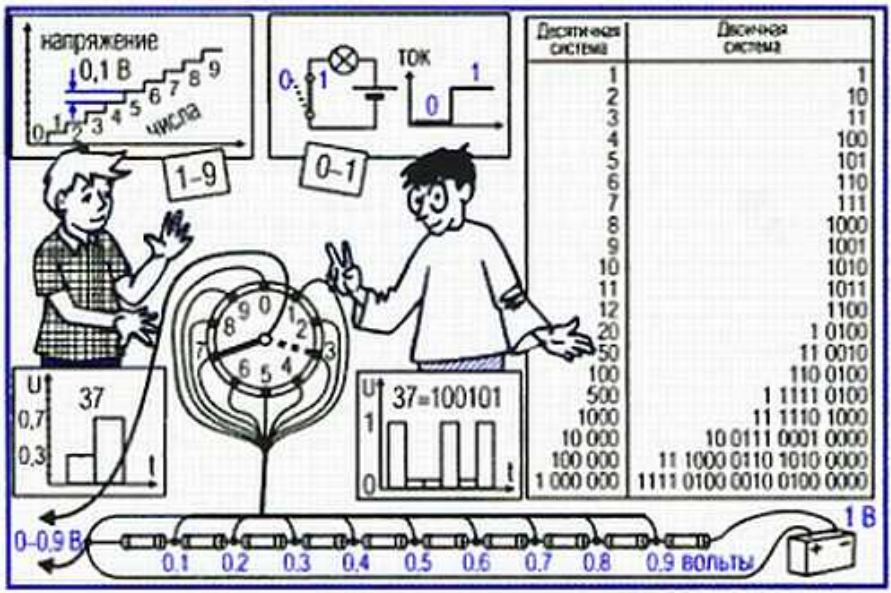
Для порядка надо бы сказать несколько слов о внутренней квартирной проводке. Когда-то она была наружной, провода с многослойной изоляцией (снаружи — декоративный матерчатый чулок) шли по стенам, закреплялись на фарфоровых роликах. По правилам пожарной безопасности в деревянных домах и сейчас делают наружную проводку, её легче загасить, если она загорится при коротком замыкании. В кирпичных и панельных домах проводка внутренняя, она проходит в стенах и потолке в специальных пустотах, они имеют технологические входы для прокладки или замены проводов. Провод медный или алюминиевый, диаметр 1,5–2 мм, обычно пара проводов конструктивно объединяется единой полихлорвиниловой изоляцией.



ВК-241. *А этот прибор принёс радиолокационные методы в медицину, осуществляя ультразвуковые исследования — УЗИ. Ультразвук (неслышимый высокочастотный звук) может многое рассказать о живой ткани, потому что она очень по-разному его пропускает и отражает. Электрические импульсы с помощью пьезокристаллов создают потоки ультразвука. Эти же кристаллы принимают его отражение, и оно создаёт электрический сигнал, который показывает на экране детали, недоступные другим приборам.*

***Т-192*. Парад домашних электрических работников**. Электрические приборы для дома поражают своим разнообразием — производители конкурируют, борются за покупателя, ищут наиболее привлекательный дизайн, пытаются ввести какие-то дополнительные удобства для пользователя. Осмотрите мысленным взором бригаду своих электрических помощников и убедитесь, что их, во-первых, немало и что, во-вторых, в последние годы заметно повысились возможности этих приборов и, главное, их надёжность — они годами работают, не требуя никакого ремонта.

Для начала обратите внимание на патрон, в который ввинчивается осветительная лампочка, и на подключение приборов к электрической сети с помощью системы «вилка-розетка». Всё это почти в точности такое же, как было более ста лет назад во времена Эдисона. Не изменились и пылесосы с переходом на электрический двигатель — первые аппараты для уборки и чистки ковров появились 150 лет назад, и их насосы вначале приводились в движение небольшим бензиновым мотором. Большое разнообразие современных электропылесосов связано с тем, что в них, как и прежде, по-разному решается главная задача — сбор пыли воздушным потоком и затем её отделение перед неизбежным возвращением воздуха в помещение. Только в дорогих пылесосах с хорошими фильтрами удаётся выбрасывать воздух с частицами размером не более трёх микрон. У многих пылесосов фильтром служит сам сменный мешок, в котором остаётся собранный мусор. Чаще всего мешок бумажный и многослойный, мельчайшие поры в бумаге рассчитаны на то, что они будут легко пропускать воздух, собирающий пыль, и не будут выпускать из мешка сами пылинки. Но, к сожалению, так бывает не всегда, и некоторые пылесосы вместе с воздушным потоком возвращают в помещение мелкую пыль.

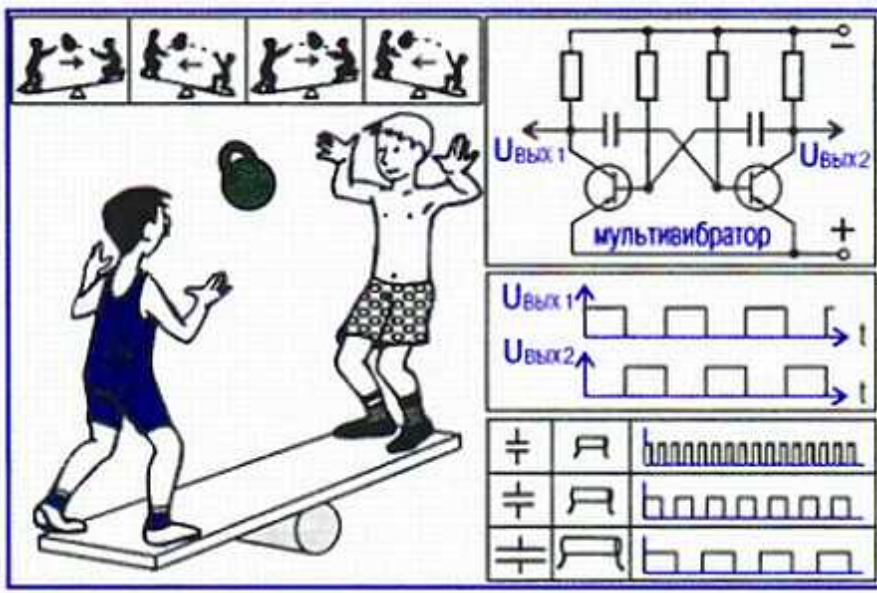


ВК-242. *Математическая десятичная система была принята потому, что она удобна. Все пальцы наших рук — это десятка. Точно так же для электрических машин удобна двоичная система, многие их элементы, такие, например, как выключатель или диод, знают только два состояния: включено — выключено. К тому же приспособить для машин нашу привычную десятку было бы очень сложно — пришлось бы, видимо, для десяти чисел употреблять десять напряжений, попав в зависимость от режима схем.*

Этот раздел введён в книгу только для того, чтобы напомнить о множестве помогающих вам домашних электрических приборов и аппаратов. О двух из них — электрическом холодильнике и электрическом кондиционере — мы, к сожалению, даже в самых общих чертах говорить не сможем. В них с использованием электрической энергии происходят слишком сложные для этой книги тепловые процессы. При этом охлаждают специальное жидкое вещество (обычно фреон), и именно оно с помощью теплообменников снижает температуру в холодильном шкафе и в морозильном (до -18 °С). Примерно так же снижается температура и влажность воздуха, через кондиционер поступающего в квартиру. Практически все остальные ваши электрические помощники содержат уже знакомые нам узлы, в частности, электрические нагреватели, светильники и небольшие асинхронные двигатели. Внимательно посмотрев на эти приборы во время парада, можно отметить обилие разных моделей, вы наверняка без особого труда поймёте, как они устроены и как

работают.

Согласно сделанному в самом начале книги предупреждению (Т-9), в список не включена техника, представляющая электронную ветвь домашнего работающего электричества. Но всякому ясно, что такие классические представители электроники, как телевизор, музыкальный центр, видеомагнитофон, электронные часы, телефон с памятью, приор для измерения артериального давления, персональный компьютер уже давно стали желанными, а часто и непременными электрическими обитателями нашего дома. Всё это, конечно же, электрические приборы (электрические!), и кое-что о них ещё будет рассказано в следующей главе.



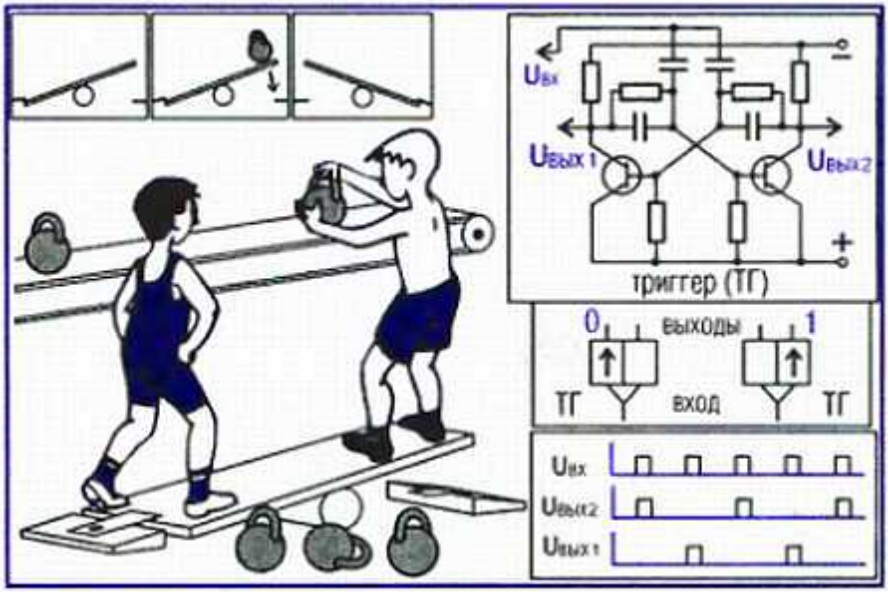
ВК-243. *Один их самых простых и просто налаживаемых генераторов — мультивибратор. Такое название он получил потому, что генерирует прямоугольные импульсы, а их спектр имеет много синусоидальных составляющих разных частот. Латинское слово «мультиум» как раз и означает «много». Коллекторная цепь каждого транзистора в мультивибраторе связана с базовой цепью соседа, и в итоге получается, что транзисторы (или усилительные электронные лампы) сами поочерёдно открывают и закрывают друг друга.*

Т-193. **Закон строг, но справедлив**. В книгах об электричестве, в том числе и в отечественных, нередко встречаются выражения типа «мощность двигателя уменьшается

не очень сильно», или «ток может весьма заметно превысить допустимую величину», или «в линии передачи теряется значительная часть общего напряжения». Все эти неопределённое™ «не очень сильно», «весьма заметно», «значительная часть» вполне применимы в рассказе о существе дела. Но вместе с тем существуют правила, инструкции, нормы, которые точно говорят, какими должны быть электрические машины, приборы или сети, как они должны сооружаться и проверяться, как они должны устанавливаться в машинном зале, как должен с ними взаимодействовать наладчик или дежурный механик, с какой точностью должны поддерживаться те или иные параметры в электрических сетях.

Точные инструкции существуют и в части электропроводки в зданиях разного типа с использованием различных установочных и крепёжных изделий, а также в части сооружения высоковольтных линий разного уровня. Правила эти готовятся очень тщательно и утверждаются довольно долго, их должны внимательно посмотреть профессионалы разных специальностей, причастные к делу. После согласования правило с десятками подписей и виз, подписанное высшими руководителями той области, к которой оно относится, становится законом, который нужно безоговорочно соблюдать, взаимодействуя с электричеством.

Профессионалы хорошо знают все эти законы и правила или во всяком случае должны знать, но рядовому пользователю, владельцу электросамовара и электробритвы они не очень нужны. За одним, правда, исключением — это Правила техники безопасности.

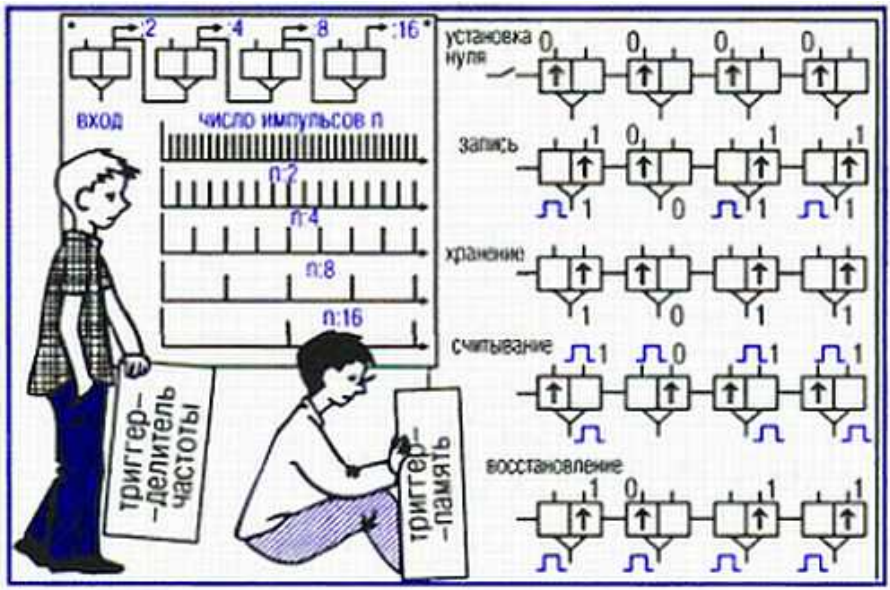


ВК-244. *Триггер чем-то похож на мультивибратор — те же два транзистора и коллектор каждого связан с базой соседа. Но схема связи иная, и этим определяется иное поведение триггера. Он остаётся в одном двух устойчивых состояний (один транзистор пропускает ток, другой закрыт) до тех пор, пока на вход не придёт внешний импульс — он и поменяет состояние триггера. Поэтому триггер делит на два число входных импульсов — частота на выходе одного из транзисторов в два раза меньше, чем на входе триггера.*

Т-194. **Электричество опасное и электричество безопасное**. С древнейших времён опасности подстерегают человека на каждом шагу, и только доведённая до автоматизма осторожность оберегает нас. Иначе можно пораниться даже маникюрными ножницами или нанести серьёзный вред здоровью неправильным приёмом прекрасного лекарства. Электричество тоже может принести немалые неприятности, если пользоваться им безграмотно и беспечно: на долю электричества приходится 40 % производственных травм, а в энергетике 60 %. Кроме того, 80 % смертельных поражений током происходит в сетях с напряжением 1000 В и больше. В электроприборах для, так сказать, личного пользования сделано, казалось бы, всё возможное, чтобы нам не попасть в беду. Но всё же случается, что безобидный, казалось бы, домашний прибор становится причиной малых или даже больших электрических неприятностей.

Представьте себе, что какая-нибудь внутренняя деталь, к

которой подведено фазовое напряжение, из-за каких-то невидимых снаружи неполадок коснулась металлического корпуса или выходящих наружу металлических частей какого-нибудь кухонного электроаппарата. И, возможно, стояли вы при этом в тряпичных тапочках на деревянном полу, который впитал какую-то влагу при уборках и через немного влажные стеньг электрически связан с землёй. С ней же связан общий провод обмотки трансформатора, с которого ваша квартира получает напряжение. Таким образом, оказалось, что к вам приложено фазовое напряжение или часть его, и через ваше тело пойдёт ток. Какой? Большой или маленький? Это, конечно, определяется по основной формуле закона Ома, если известно сопротивление цепи. А оно определяется сопротивлением нашего тела, сопротивлением его контактов с токонесущими предметами и многими другими факторами. Иными словами, электрический ток через человеческое тело, попавшее под напряжение, может заметно различаться. А вот что можно назвать достаточно точно, так это результаты воздействия токов разной величины, проходящих по нашему телу. При силе тока 0,5–1,5 мА (миллиампер) — лёгкое дрожание пальцев руки; 2–3 мА — сильное дрожание; 5–7 мА — лёгкие судороги и болевые ощущения в руках; 8-10 мА — сильные боли в пальцах, кистях рук и предплечьях, руки трудно оторвать от металла под напряжением; 20–25 мА — паралич рук, очень сильные боли, дыхание затруднено; 50–80 мА — остановка дыхания, начало фибрилляции сердца (потеря ритма); 90-100 мА — остановка дыхания, через 3 секунды остановка сердца. Все эти данные относятся к переменному току с частотой 50 Гц, постоянный ток начинает ощущаться позже (5–7 мА), но дальше результаты его воздействия, как и при переменном токе.



ВК-245. *Самая распространённая профессия триггера — элемент памяти, запоминающий один бит информации (единицу «1» или ноль «0»). При этом 1 соответствует одному устойчивому состоянию триггера, а 0 другому. Часто формируют группы триггеров, с которыми можно одновременно производить определённые операции, например выставить 0, то есть подготовить все триггеры к запоминанию новой информации. А можно сразу прочитать большое число или слово, записанные в большой группе триггеров.*

Можно, конечно, надеяться, что твоё попадание под напряжение завершится малым проходящим по телу током и быстрым освобождением от него. Но так, к сожалению, бывает не всегда, особенно в дождливую погоду, в домике на садовом участке, при только что вымытых полах и (или) мокрых руках. Какие-то правила можно сразу же придумать для себя и применять без отлагательств. Старайтесь не трогать металлические части и корпус включённого электроприбора. Старайтесь как-то изолировать себя от сырого пола, например сухой обувью. Все детальные осмотры электроприборов и тем более ремонтные работы с ними проводите, обязательно выключив прибор из сети. Работать желательно тогда, когда в квартире ещё кто-то есть, чтобы было кого позвать на помощь, — иногда при поражении током человек не может своими силами освободиться от токонесущих проводов. И главное — найдите тонкую и понятную книжечку о технике безопасности и

внимательно просмотрите её.

Глава 20
Фантастическая электроника

В начале XX века, то есть примерно 100 лет назад, у престижного звания «инженер-электрик» появились добавления: «сильноточник» и «слаботочник». Понадобились эти добавления потому, что в использовании электричества образовались две большие области. Одна область занималась электрическим освещением, генераторами, двигателями и имела дело со сравнительно сильными токами. Другая область занималась телеграфом, телефоном и только что появившимся радио. Через какое-то время в сферу слаботочной электротехники вошли электронные лампы, аппаратура звукового кино, автоматы, вычислительная техника, телевидение. В итоге родилась гигантская самостоятельная область электротехники — современная электроника.

Т-195. **Шедевры доисторической электроники.** Упоминание о доисторической электронике многие читатели наверняка приняли за шутку, что-то вроде старого анекдота, очень смешного, если, конечно, не делать его элементом межнационального пикирования. Египтянин рассказывает израильскому соседу: «При раскопках в районе пирамиды Хеопса нашли кусок медного провода. Что это значит? Это значит, что в Древнем Египте был телефон». Израильтянин отвечает: «При раскопках в районе Иерусалима ничего не нашли. Что это значит? А то, что в древнем Израиле было радио».

Упоминание доисторической электроники никак не шутка, не анекдот, речь идёт о появлении миллиарды лет назад электронных систем живого организма. Чтобы не создавать терминологическую путаницу, их не принято причислять к электронике, хотя, по сути дела, по сущности физических процессов, это самая настоящая электроника, только созданная не человеком, а природой. Уже у древних одноклеточных организмов появились простейшие электрохимические устройства для сбора информации об окружающей обстановке. С их помощью какая-нибудь древняя бактерия охотилась за пищей и уходила от опасности. В какое-то время появились специализированные нервные клетки для работы с информацией, потом они стали объединяться, формируя автоматы управления,

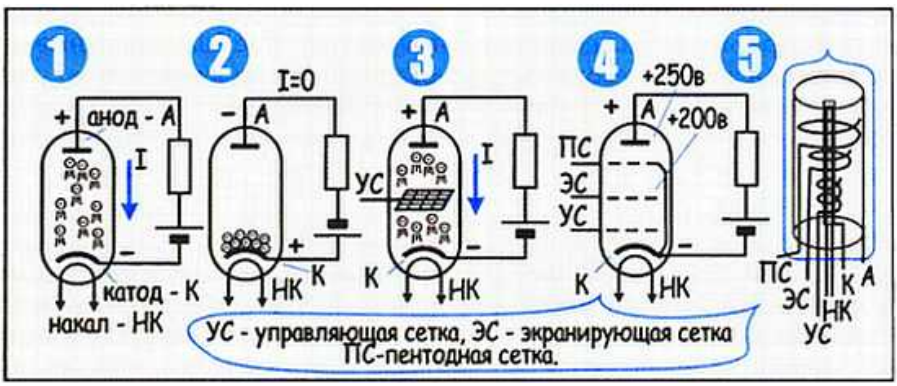
сначала простейшие, а затем всё более сложные — электроника живого усложнялась и совершенствовалась.

Шли годы, тысячелетия, миллионы и миллиарды лет, естественный отбор лучших биологических конструкций привёл в итоге к нынешнему высочайшему уровню информационных систем живого мира. Самый знакомый нам пример — человек. Его органы чувств, в частности зрение, слух, обоняние, собирают информацию о внешнем мире. Его внутренние датчики собирают сведения о работе сердца, лёгких, печени, мышц, кровеносных сосудов. Всю эту информацию обрабатывают соответствующие отделы мозга и мгновенно выдают необходимые команды управления. Например, при беге увеличивают частоту сердечных сокращений, при появлении красного светофора дают команду нужным мышцам, и нога водителя нажимает на педаль тормоза. Принимая решения, мозг обращается к своим информационным запасам, к памяти.

Особо важную роль играют информационные процессы, поддерживающие интеллект человека, то, чего нет у других представителей животного мира. Объединяющая людей речь, модели-слова, слоговое письмо, логическое мышление, мысленные операции с трёхмерными геометрическими моделями — в основе всего этого сложные электрохимические процессы в нервных сетях и в мозге, в системах, которые вполне можно было бы назвать нашей внутренней электроникой.

Три столетия назад на помощь мускулам пришли первые паровые машины, открыв эпоху новых наших могучих помощников. Инструмент, которым были сделаны эти первые тепловые машины, позднее образно назвали продолжением человеческой руки. С давних времён человек пытается создать продолжение своего интеллекта и сделал на этом пути великие изобретения: он придумал письменность, математику и книгопечатание, простейшие приборы для вычислений, такие как счёты и арифмометр, придумал чертежи и географические карты. Но ни с чем не сравнимую лавину информационной техники породило начавшееся в этой сфере сравнительно недавно использование электричества.

ВК-246. *Три простые схемы выполняют операции, похожие на элементы наших логических рассуждений, и поэтому их называют логическими элементами И, ИЛИ и НЕТ. Элемент ИЛИ — это два параллельно соединённых выключателя, цепь замкнута, если замкнут любой из них: или первый, или второй. У элемента И выключатели соединены последовательно, и цепь будет замкнута только в том случае, когда замкнуты оба эти выключателя — и первый, и второй. Третий элемент НЕТ представлен на рисунке ВК-247.*



Р-97. ВСЁ НАЧАЛОСЬ С ЗАБРОШЕННОГО «ЭФФЕКТА ЭДИСОНА». В первых радиоприёмниках для улавливания и регистрации электромагнитной волны использовали прибор с односторонней проводимостью — когерер. Это

была стеклянная трубка с металлическими опилками, её нужно было часто встряхивать, чтобы привести в рабочее состояние. Поиски замены когереру шли в двух направлениях — одностороннюю проводимость пытались получить в газах и в твёрдом теле. И тут в 1894 году Эдисон обнаружил нечто, получившее название «Эффект Эдисона», — в обычной осветительной лампочке был обнаружен электронный поток одного направления. Сам Эдисон не стал этим заниматься — кто-то утверждает «Проворонил!», но, скорее всего, занятый своими делами изобретатель просто не нашёл времени на новые исследования. Используя «Эффект Эдисона», профессор Флеминг через десять лет поисков, ошибок и находок создал первую электронную лампу — диод с односторонней проводимостью (1, 2). А ещё через несколько лет инженер Ли де Форест поместил в диод управляющую сетку и получил первую усилительную лампу — триод (3). Лампы в итоге пришли к особо популярному трёхсеточному усилителю — к пентоду в стеклянном или металлическом корпусе (4,5), мировой выпуск которого измерялся миллиардами ламп. Примерно в 1960 году электронные лампы начали широко заменять транзисторами, а затем и интегральными схемами. Но практически вся радиоэлектроника, включая цветное телевидение, звукозапись, мощные передатчики, автоматику, космические аппараты, вычислительные машины, была создана и долго развивалась в ламповом варианте.

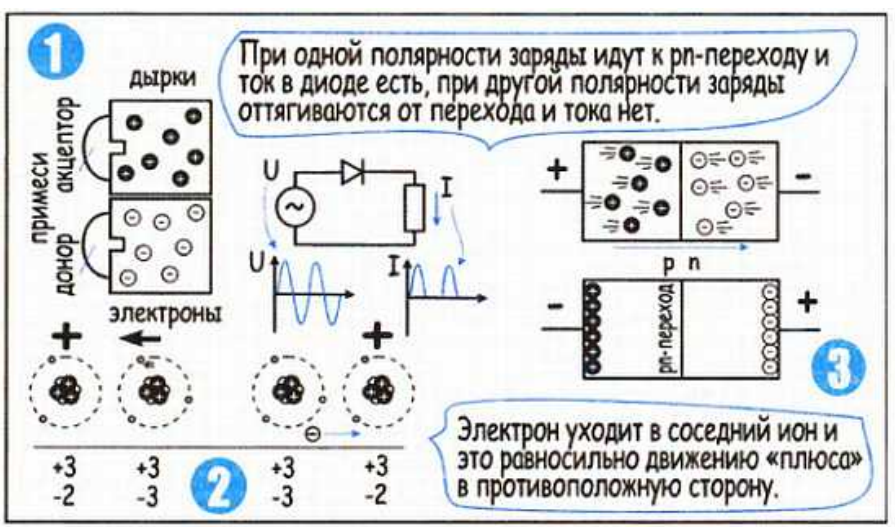
Т-196. **Информатика выбирает электричество**. Информационные приборы и системы создаются на разной физической основе, они, например, бывают химические, акустические, механические, пневматические, гидравлические. Примеры акустической информатики — звуковые сигналы в мире животных, ультразвуковая локация у летучих мышей и, конечно, наша, человеческая речевая связь. Механические информационные устройства тоже всем известны, это, например, красный флажок на шахматных часах, падая, он сообщает, что время истекло, партия окончена. Да и сами часы — тоже механическое информационное устройство, они так пересчитывают число колебаний маятника, что стрелки показывают часы, минуты и секунды. Простейший гидравлический информационный прибор можно представить

себе в виде прозрачной пластмассовой трубки, которая выходит из нижней части большого металлического бака, поднимается вверх до его кромки и показывает уровень жидкости, имеющейся в баке. Пневматических информационных приборов так много, что их объединяет отдельная область техники — пневмоника, она занимается передачей и переработкой информации, записанной в потоках сжатого воздуха. Ну а химические информационные процессы можно встретить не только в живом организме, но и в химической индустрии.

И всё же подавляющее большинство информационных приборов, аппаратов и систем — электрические. В числе их достоинств высокая скорость электрического сигнала, возможность работать с чрезвычайно слабыми сигналами, их исключительная пластичность, многообразие методов формирования электрического сигнала. Электроника очень часто выигрывает соревнование с неэлектрической информационной техникой и, более того, делает то, что можно сделать только с помощью электричества.

В конце позапрошлого века (незадолго до 1900 года) на помощь человеческому интеллекту пришла техника, которая позже стала частью электроники, — техника электрической связи, новый инструмент общения. Довольно быстро электроника создала и другие системы в помощь нашему интеллекту, в том числе электронные автоматы, избавляющие человека от огромных объёмов рутинной работы контроля и управления. Появилась электронная память, умеющая мгновенно извлекать из огромных своих хранилищ нужные тексты, цифровую информацию, звук, картинку, Были придуманы и построены радиолокатор, электронный микроскоп, детекторы ядерных частиц, ультразвуковой дефектоскоп. Наконец, появились компьютеры, нечто большее, чем вычислительная машина, мощнейший помощник мыслящего человека. И у всех этих приборов, аппаратов и систем, несмотря на их различия, одно и то же главное действующее лицо — электричество, электрические сигналы.

ВК-247. *Логический элемент НЕТ устроен не так просто и, если можно так сказать, делает всё наоборот. Это один выключатель, и можно сказать, что если он замкнут, то не пропускает ток в цепь, которой управляет, а если разомкнут, то пропускает. Так, например, если на входе элемента НЕТ действуют импульсы тока, то на его выходе этих импульсов нет. А если на вход элемента НЕТ импульсы тока не поступают, то на его выходе они есть и действуют вполне нормально.*



Р-98. ДИОД: ИЗ ВАКУУМА В

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ КРИСТАЛЛ. Вакуумные диоды начали серийно выпускаться лет 70–80 назад, и примерно в то же время или несколько позже стали создаваться самые разные твердотельные диоды, в том числе и полупроводниковые. Основа полупроводникового диода — кусочек кристаллической пластины, чаще всего кремния. В него вводятся две примеси, донор и акцептор, в переводе дарящий (электроны) и забирающий. Эти примеси создают две зоны свободных зарядов (1) — зону **n** со свободными электронами и зону **p** со свободными положительными зарядами, как их называют, «дырками». С электронами должно быть всё понятно — в кремний вводится донорная примесь, которая увеличивает число свободных электронов. А вот свободный положительный заряд «дырка» появляется потому, что акцепторная примесь отбирает у некоторых атомов электрон, и такой атом становится «дыркой». Теперь представьте себе, что рядом находятся два атома — нейтральный (полностью укомплектованный) и с недостающим электроном, то есть «дырка». Когда из нейтрального атома в «дырку» переходит электрон, то это равносильно движению положительного заряда в противоположную сторону. Именно так за счёт быстрого перемещения электронов в полупроводнике движутся «дырки», и этим объясняется односторонняя проводимость диодов, Некоторые типы твердотельных диодов уже очень давно широко выпускали и использовали в выпрямителях. А вот твердотельного аналога трёхэлектродной лампы, то есть твердотельного усилителя, пришлось ждать 40 лет/

Т-197. **Два вида электрических сигналов — аналоговый и цифровой**. Уже самые первые системы электрической связи — телеграф (1836) и телефон (1874) — знакомят нас с главным действующим лицом всей электроники, с электрическим сигналом. Точнее, с двумя его разновидностями — аналоговым сигналом (телефон) и цифровым (телеграф).

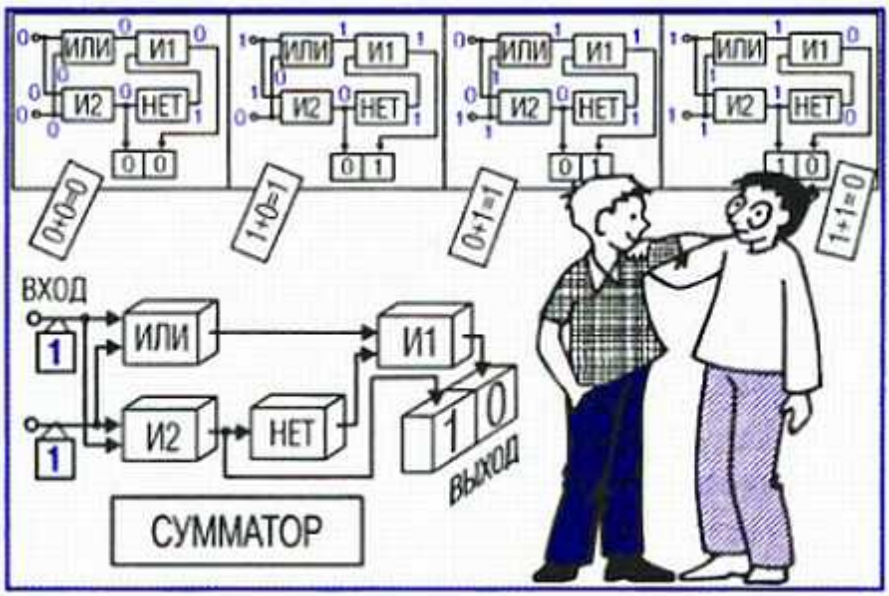
Значение слов записано в их звучании, в быстрых и сложных изменениях воздушного давления в потоке выдыхаемого воздуха. Звук попадает в микрофон и там создаёт свою электрическую копию — электрический ток, в котором в точности повторяются все изменения звукового давления. Это и есть аналоговый электрический сигнал (правильнее было бы сказать аналогичный,

то есть похожий), который на другом конце телефонной линии вновь будет превращён в звук.

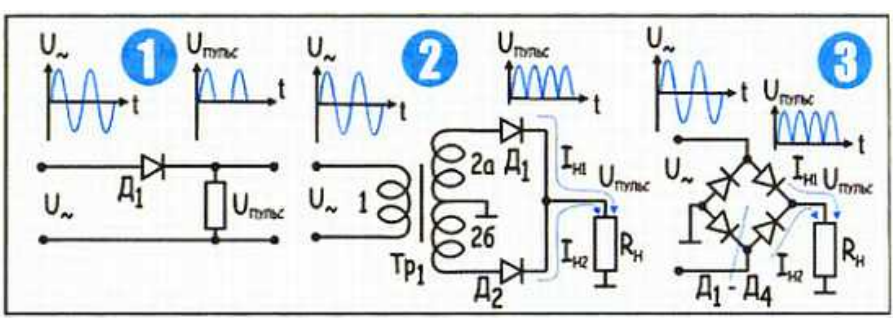
Телеграф кодирует отдельные буквы, цифры и знаки с помощью комбинации электрических импульсов, иногда разных («точка» и «тире», код Морзе), иногда одинаковых (код Бодо, код КОИ-8 и другие). В линию связи уходят буквы в виде комбинаций электрических импульсов, или иначе, как его называют, цифрового сигнала, который будет автоматически расшифрован в буквопечатающем аппарате.

Т-198. **Процессы линейные и нелинейные**. Чтобы в предыдущих главах не перегружать и без того непростые разделы электротехники, из них было перенесено поближе к концу следующее чрезвычайно важное сообщение: зависимость одной какой-нибудь величины от другой может быть линейной, а может быть и нелинейной. Возьмём, к примеру, хорошо известную из школьной арифметики прямую пропорциональную зависимость величины В от величины А: если величина А возрастёт в миллион раз, то В нисколько не отстанет и также возрастёт в миллион раз. График такой зависимости имеет вид прямой линии, отсюда и само название линейная зависимость. Если же такой прямой пропорциональной зависимости нет, если при разных значениях А величина В растёт или уменьшается по-разному, то график такой зависимости имеет вид кривой или ломаной линии, и зависимость эта называется нелинейная (Р-103).

Нелинейные зависимости, нелинейные элементы, схемы и приборы играют особо важную роль, в том числе и в электронике, только с их помощью можно так изменить сигнал, что в его спектре появятся новые составляющие. Вскоре из наших рассказов вы узнаете об электронных схемах, в которых только благодаря нелинейным процессам решаются непростые задачи — изменение спектра электрического сигнала с последующим использованием новых составляющих. В то же время нередко нелинейные процессы крайне нежелательны и даже называются нелинейные искажения. Например, появление новых составляющих в спектре воспроизводимого звука делает его хрипловатым, загрязняет звук посторонними шумами, говорит о повреждениях или о низком классе электронной аппаратуры.



ВК-248. *Сумматор — группа логических элементов. Она в любых сочетаниях складывает 1 и 0, в том числе выполняет непростую операцию 1 + 1 = 10, где нужно получить 0 и перенести 1 в следующий разряд. Такой перенос осуществляет логический элемент И2 — только в случае 1 + 1 он посылает импульс в следующий разряд. Элемент НЕТ, получив входной импульс, не выдаёт импульс на выходе, и из-за этого не срабатывает И1. В случае 1 + 0 и 0 + 1 элемент НЕТ выдаёт выходные импульсы, с помощью которых срабатывает И1.*



Р-99. ТРИ ГЛАВНЫЕ СХЕМЫ ВЫПРЯМИТЕЛЯ. За свою долгую историю диоды приобрели много радио- и электротехнических профессий. Одна из широко известных — выпрямление переменного напряжения, превращение его в постоянное. Такая задача возникала часто, так как в жилые дома и на предприятия с

электростанций приходило переменное напряжение, а для многих домашних приборов и аппаратов (например, для телевизоров) требовалось постоянное. Вакуумный диод для выпрямления имел собственное название — кенотрон, что в переводе означало «вакуумный» (от греческого «кено» — «пустой») электронный прибор. Со временем кенотроны были полностью вытеснены твердотельными выпрямительными диодами.

Самая простая схема выпрямителя использует только один полупериод переменного напряжения, она так и называется — однополупериодный выпрямитель (1). Недостатки его легко заметить. Во-первых, мощность постоянного тока получается значительно меньше, чем была бы при использовании двух полупериодов. Во-вторых, сравнительно большой перерыв между соседними импульсами трудно заполнить. В-третьих, фильтру труднее отводить переменные составляющие полученного импульсного тока — нам ведь нужна только его постоянная составляющая. По этим и по другим причинам к однополупериодной схеме прибегают редко и в основном используют двухполупериодный выпрямитель. Например с трансформатором (его обычно называют силовым), у которого фактически две вторичные обмотки, работающие поочередно (2). Двухполупериодное выпрямление можно получить и без трансформатора, используя так называемую мостовую схему, в которой четыре выпрямляющих прибора вместо двух (3). Многие представляют себе выпрямитель как очень небольшую схему, используемую в телевизоре, приёмнике или магнитофоне. Однако в промышленности и на транспорте используют большие и очень мощные выпрямители для питания машин, которым необходимо постоянное напряжение.

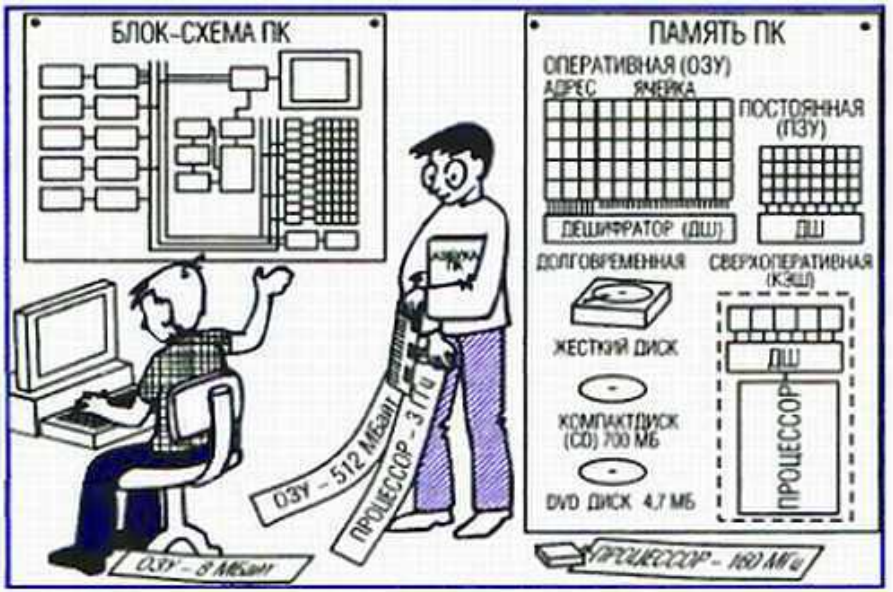
Т-199. **Вакуумный диод — прибор с односторонней проводимостью**. В одном из первых электронных приборов всё происходит в вакууме, в стеклянном баллоне, из которого откачан воздух. Прибор называется диод, поскольку в нём два электрода — катод и анод. Катод, как нить электролампы, сильно нагревают током от отдельного источника, например, от низковольтной обмотки трансформатора (накальная обмотка) или от батареи. При этом из раскалённого катода вылетают электроны, они сразу же двигаются к аноду, если на него подать

«плюс», в цепи появляется анодный ток (Р-97.1, не забудьте, что условное направление тока, то есть направление стрелки на рисунках, — от «плюса» к «минусу», в данном случае от анода к катоду).

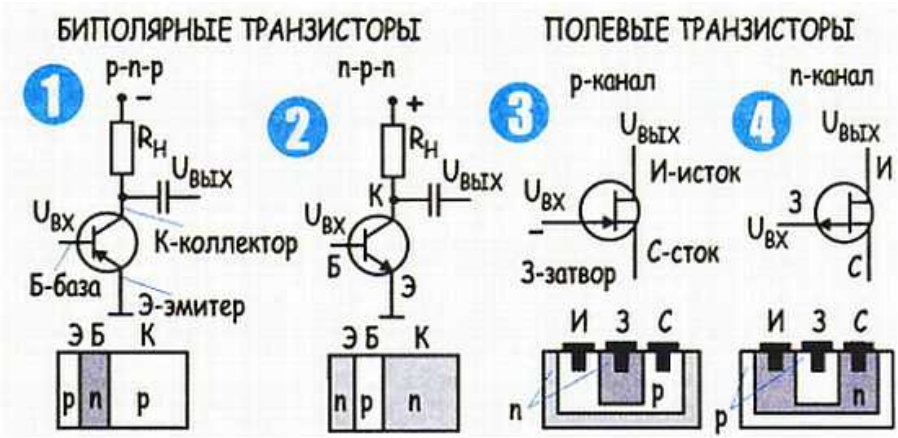
Если же на анод подать «минус» (Р-97.2), то он будет отталкивать электроны, и ток через диод не пойдёт. А если между анодом и катодом будет действовать переменное напряжение, то электроны будут двигаться к аноду, только когда на нём будет «плюс», то есть только во время положительных полупериодов. А это значит, что в цепи пойдёт пульсирующий ток — хоть и меняющийся по величине, но ток только одного направления. Отсюда вывод: диод — прибор с односторонней проводимостью, он может быть выпрямителем переменного тока.

Т-200. **Первый электронный усилительный прибор — вакуумный триод**. В самом начале прошлого века, а точнее, в 1907 году, было сделано совсем неприметное, казалось бы, изобретение, на основе которого в итоге выросла могучая и многообразная электроника. Вакуумный диод превратили в триод — между катодом и анодом вставили третий электрод, металлическую сетку с впаянным в стекло проволочным выводом (Р-97.3). Сетка находится близко к катоду, напряжение на ней очень сильно влияет на анодный ток, и он послушно меняется вслед за слабым сигналом на сетке, поэтому сетку назвали управляющей. В итоге, пролетев сквозь управляющую сетку, электроны создают ток в анодной цепи, создают мощную копию слабого сигнала. И вот что главное: энергию для этой мощной копии даёт анодная батарея, а задача триода — управлять анодным током, копируя слабый сигнал на управляющей сетке, создать мощную копию усиливаемого сигнала, что как раз и называется усилением. Так электровакуумный триод решил одну из главных и, казалось, неразрешимых проблем электросвязи — позволил усиливать ослабевшие после долгого пути телефонные и радиосигналы.

А вскоре триод стал основой принципиально нового генератора переменных токов высокой частоты, элементом памяти, инструментом вычислительных операций. Появление электронного усилителя привело к появлению новых схем, новых методов работы с сигналами, новых направлений электротехники слабых токов. Постепенно на смену триоду пришли более совершенные электронные лампы, главным образом пятиэлектродная — пентод (Р-97.4, Р-97.5). Но через 40 лет после своего рождения уже почти забытый триод вновь стал главным и даже единственным усилительным прибором. Но это уже был не вакуумный, а полупроводниковый триод.



ВК-249. *Основные блоки персонального компьютера ПК, определяющие его возможности, — процессор ПР и оперативное запоминающее устройство ОЗУ. Важная характеристика процессора — его наибольшая рабочая частота, то есть частота импульсов, из которых в итоге формируются все двоичные коды. Часть из них переносят в ОЗУ, где с кодами можно работать и таким образом править слова, цифры, картинки и т. п., а затем запоминать исправления и переносить их в долговременную память.*



Р-100. ВРЕМЯ ТРАНЗИСТОРА. Уже на примере диода

было видно, что твердотельный прибор намного удобней иметь, чем электронную лампу. Полупроводниковым диодом может быть кусочек кристалла миллиметровых размеров, а электронная лампа — это целый научный прибор, миллиметровым его никак не сделаешь. Из вакуумного диода усилительная лампа получилась довольно просто — достаточно было вставить сетку между катодом и анодом. Но как вставить сетку в микроскопический кристалл? Один раз, правда, мир был обрадован — в 1922 году, как писали газеты, задача была решена. Молодой (19 лет) русский радист Олег Лосев из Нижегородской радиолаборатории создал кристаллический усилитель кристадин и построил с ним очень чувствительные радиоприёмники. Но вскоре оказалось, что из-за своей нестабильности кристадин не может конкурировать с электронными лампами. Задачу решили в 1948 году и создали транзистор американские теоретики высокого класса — Джон Бардин, Уолтер Браттейн и Вильям Шокли, их работа была отмечена Нобелевской премией. К нынешним временам транзисторы прошли сложный путь (их уже делают размером меньше 0,005 миллиметра), и сегодня выпускаются две их основные разновидности.

Плоскостные транзисторы представляют собой трёхслойную систему из полупроводников германия или кремния с электронной (**n**) и дырочной (**p**) проводимостью (1,2). Слабый входной сигнал $\mathbf{U}_{вх}$ в итоге поставляет свои заряды в базу, из неё они попадают в коллекторный **pn**-переход, участвуют в создании коллекторного тока и усиливаются за счёт коллекторной батареи. Транзисторы второго типа, полевые (3,4), по принципу действия напоминают усилительную вакуумную лампу триод. Основной ток в них создаётся между истоком и стоком, а напряжение входного сигнала $\mathbf{U}_{вх}$ своим электрическим полем с затвора управляет этим током, подобно тому, как в вакуумном триоде сетка управляла анодным током. Полевые транзисторы в основном рассчитаны на работу с импульсными сигналами, и потому их можно сравнить с выключателем, который замкнут или не замкнут, то есть пропускает ток или не пропускает.

Т-201. **Транзистор — главный работник электроники.**

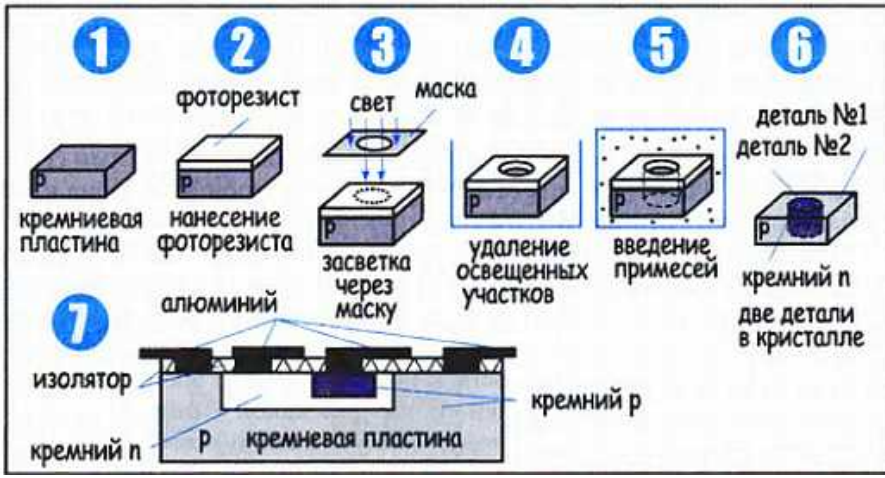
Полупроводниковый диод появился практически одновременно с вакуумным, но полупроводниковому усилителю, как уже говорилось, пришлось ждать своего часа 40 лет. Сегодня диод создают в маленьком кристаллике полупроводников германия или кремния — с помощью примесей формируют в нём две зоны с разными электрическими свойствами (Р-98). В одной из них есть свободные электроны, это зона *n*, от слова negativus — «отрицательный». В другой зоне есть свободные положительные заряды (для упрощения считайте их положительными ионами, Т-8), это зона *p*, от слова positivus — «положительный». Пограничная область между зонами *p* и *n* называется *pn*-переход.

Поведение полупроводникового диода, также как и вакуумного, зависит от того, в какой полярности к нему подведено внешнее напряжение — к какой зоне подключён «плюс», а к какой «минус». В одном случае («плюс» подключён к катоду, «минус» к аноду) свободные заряды оттягиваются от *pn*-перехода и ток через диод не проходит — он напоминает две обкладки конденсатора с изолятором между ними. При другой полярности («плюс подключён к аноду, «минус» к катоду) внешнее напряжение подтягивает свободные заряды к *pn*-переходу, там они непрерывно нейтрализуют друг друга (Т-8), в цепи идёт ток, поставляющий в *pn*-переход новые положительные и отрицательные заряды.

Даже новичок, тот, кто впервые знакомится с работой полупроводниковых диодов, довольно быстро сам сообразит, что с движением электронов в сторону *pn*-перехода никакой проблемы нет — свободные электроны, которых тянет к себе «плюс», всегда найдут лазейку (Т-8), чтобы просочиться в его сторону. Но как быть с положительными ионами? Они же не могут свободно двигаться, они связаны со структурой самого полупроводникового материала, входят в его кристаллическую решётку и практически неподвижны. Чтобы прояснить эту неясность, изготовим (разумеется, мысленно) простейшую учебную модель — два расположенных рядом атома. Один из них полностью укомплектован электронами и собственного электрического заряда не имеет. У другого атома одного электрона не хватает, это фактически положительный ион с единичным положительным зарядом. Представьте себе, что из нейтрального атома один электрон быстро перескочил в этот положительный ион и превратил его в нейтральный атом. А сам нейтральный атом при этом, естественно, стал положительным ионом — теперь у него не хватает одного электрона, то есть имеется лишний положительный заряд. Не вдаваясь во все эти подробности, можно отметить конечный результат: в

полупроводниковом кристалле произошло перемещение положительного заряда. Движение электрона произошло так быстро, что его даже нельзя считать свободным электроном, а подвижные положительные ионы могут существовать достаточно долго — до следующего электронного прыжка (Т-8). В литературе о полупроводниках эти ионы с лишним положительным зарядом получили имя дырки (видимо, имеется в виду свободное место отсутствующего электрона), и именно их считают свободными подвижными положительными зарядами.

ВК-250. *В конце 1947 года появились транзисторы, и ещё долго основное внимание обращали на их огромные достоинства в сравнении с электронной лампой: малые размеры и один источник питания вместо двух. Но затем главными стали другие достоинства транзистора, особенно возможность создания интегральных схем. В них тысячи, миллионы, а теперь уже и миллиарды транзисторов (их размеры уже измеряются нанометрами!), связанных в одном кристалле, образуют готовый сложный электронный блок.*



Р-101. ПЛАНАРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ — ОТ ТРАНЗИСТОРА К МИКРОСХЕМЕ. Планарная технология была придумана и разработана для автоматизированного производства транзисторов, а спустя некоторое время без принципиальных изменений переведена на производство интегральных микросхем. Слово «планарная» происходит от латинского «планус» — «плоский» и напоминает, что исходная кремниевая пластина (на рисунке 1 показан очень маленький её участок) и детали изготовленных в ней транзисторов — тоже плоскости. На круглой пластине толщиной несколько миллиметров и диаметром 40–60 сантиметров в едином технологическом процессе формировали несколько десятков, а то и несколько сотен одинаковых транзисторов. Мы сейчас посмотрим, как методами планарной технологии в пластине создаётся какая-нибудь одна новая деталь, — все остальные делаются примерно так же.

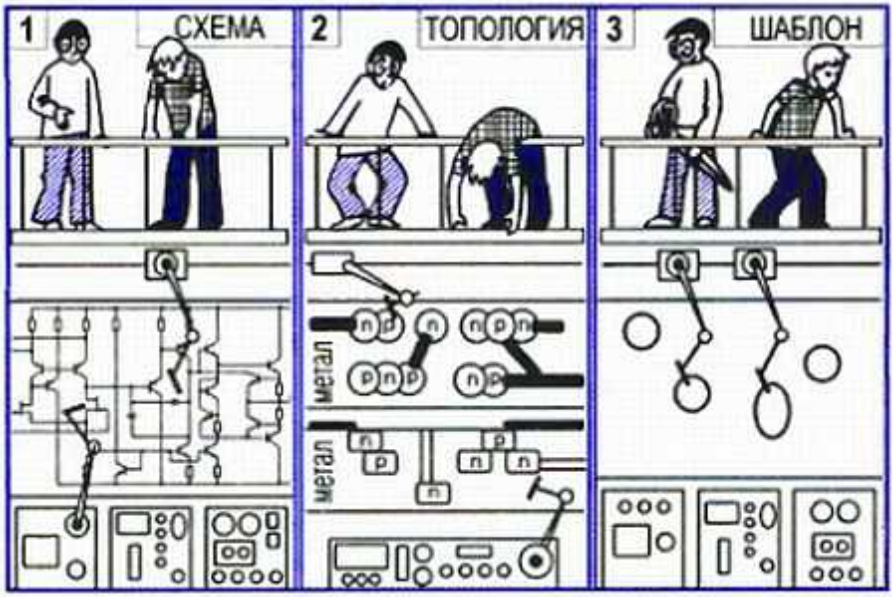
Для начала кристалл (1) покрывают тонким светочувствительным слоем — фоторезистом (2). Затем фоторезист засвечивают через очень точно изготовленную маску (3) — через особый тёмный рисунок с маленькими прозрачными пятнышками. Через них происходит засветка тех мест, где должны появиться новые детали. После этого фоторезист обрабатывают проявителем и засвеченные участки удаляют — образуются окна, оставляющие доступ к кристаллу (4). Затем пластину помещают в вакуумную камеру, заполненную газом, который содержит нужную

(например, донорную) примесь (5), и в итоге в кристалле получают две детали — с **p**- и **n**-проводимостью (6). Повторяя подобную процедуру с разными масками, можно получить не только транзисторы (7), но и расположенные в одном кристалле интегральные схемы, в которых 5–6 слоёв деталей, нередко связанных внешним токопроводящим покрытием.

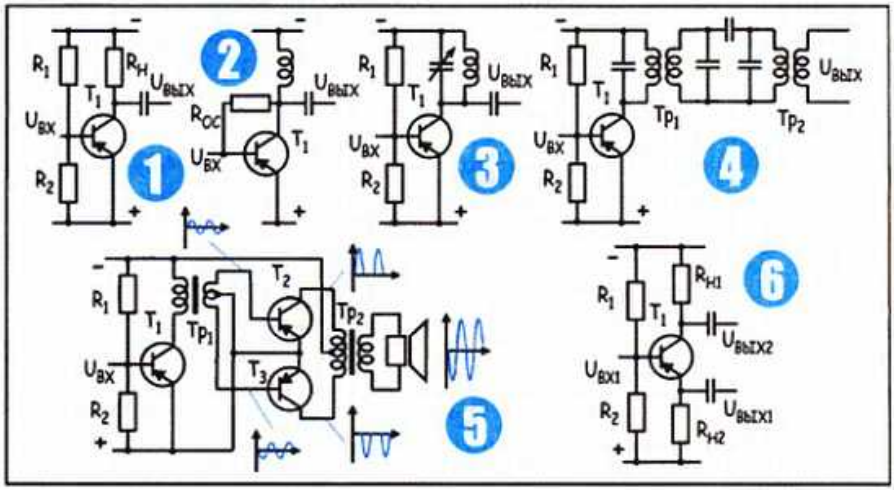
Итак, полупроводниковый диод, как и вакуумный, проводит ток только в одну сторону и может использоваться как выпрямитель переменного тока. В электронике, как правило, нужны маломощные диоды, рассчитанные на миллиамперы и микроамперы. Но существуют очень мощные диоды, пропускающие ток в сотни и тысячи ампер, и их широко используют в энергетике.

С помощью примесей можно сформировать в германиевом или кремниевом кристаллике трёхэлектродный полупроводниковый прибор транзистор, он имеет трёхслойную структуру *p-n-p* или *n-p-n* (Р-100). Одна крайняя зона называется «эмиттер» (выбрасывающий заряды), другая — «коллектор» (собирающий заряды), а средняя зона называется «база», что отражает конструктивные особенности первых транзисторов.

Как и вакуумный триод, транзистор даёт возможность усиливать слабые сигналы. Управляющее напряжение действует между эмиттером и базой, оно управляет коллекторным током своими методами (Т-8), но, как говорится, важен результат — в коллекторной цепи появляется мощная копия слабого сигнала, действующего в базовой цепи. По принципу действия особенно сильно похожи на вакуумный триод очень распространённые полевые транзисторы, три их основные «детали» исток, сток и затвор совсем уже напоминают катод, анод и управляющую сетку усилительной электронной лампы. В частности, усиливаемый сигнал подаётся на затвор, а он, подобно управляющей сетке, своим электрическим полем управляет током, который протекает между истоком и стоком.



ВК-251. *На этих трёх рисунках и семи последующих показаны важные этапы производства интегральных схем. Началом можно считать разработку, проверку и создание окончательного варианта электронной схемы, которую нужно получить (1). Затем разрабатывается топология — создание в кристалле участков с разной проводимостью, их размещение и соединение (2). Затем в большом размере создаются маски (3) — размещение отверстий, через которые в кристалл будут вводиться примеси.*



Р-102. ОТ УСИЛЕНИЯ К УСИЛИТЕЛЮ. Так же как

электронная лампа, транзистор обрастает резисторами, конденсаторами и другими деталями, превращаясь в усилительный каскад или иной схемный узел, работающий с электрическими сигналами. На рисунке некоторые схемы транзисторных усилителей. Первая из них (1) — типичный усилитель низкой частоты (НЧ), на вход которого поступает усиливаемый сигнал $\mathbf{U_{вх}}$, а усиленный сигнал $\mathbf{U_{вых}}$ снимается с коллекторной нагрузки и через конденсатор передаётся дальше, скорее всего для дальнейшего усиления. С делителя напряжения $\mathbf{R_1R_2}$ небольшая часть коллекторного напряжения $\mathbf{U_к}$ подаётся на базу в качестве начального смещения. Это нужно для того, чтобы диод эмиттер-база был открыт и входной сигнал $\mathbf{U_{вх}}$ мог бы легко поставлять заряды в базу. Следующий усилитель (2) — высокочастотный (ВЧ), это видно по нагрузке в виде катушки $\mathbf{L_н}$ без сердечника. Роль нагрузки может выполнять и колебательный контур $\mathbf{L_кC_к}$ (3), который конденсатором переменной ёмкости можно настраивать на частоту принимаемой станции. В усилителях промежуточной частоты супергетеродинных приёмников (Р-111) может быть многозвенный фильтр из нескольких контуров (4), частота настройки которых никогда не меняется. На следующей схеме (5) двухтактный усилитель НЧ, транзисторы которого $\mathbf{T_1}$ и $\mathbf{T_3}$ работают поочередно (это несколько напоминает двухполупериодный выпрямитель, Р-99) и снабжают мощным выходным сигналом громкоговоритель. Два сдвинутых по фазе на 180° входных напряжения для транзисторов $\mathbf{T_1}$ и $\mathbf{T_3}$ поступают от предыдущего каскада на транзисторе $\mathbf{T_1}$, а конкретно с двух половинок вторичной обмотки трансформатора $\mathbf{Тр_1}$. Этот каскад усилителя называют «фазоинвертор», то есть фазовращатель. Можно использовать и более простой фазоинвертор, без трансформатора (6), — два противофазных напряжения $\mathbf{U_{вых1}}$ и $\mathbf{U_{вых2}}$ получают в нём на двух сопротивлениях нагрузки, одно из которых $\mathbf{R_{н1}}$ включено в цепь коллектора, а другое $\mathbf{R_{н2}}$ в цепь эмиттера.

Т-202. **Схемные блоки аналоговой аппаратуры**. Электронных схем, разумеется, существует бессчётное множество, но, как правило, каждая — это сочетание некоторых основных

схемных блоков, которых, правда, тоже немало вариантов. Но даже не вникая в эти подробности, поняв назначение и принцип действия основных схемных блоков, поняв суть дела, легче приподнять завесу таинственности, которая так часто присутствует в сообщениях о шедеврах электроники.

Т-203. **Усилитель.** Транзистор — основа усилителя, но ещё не усилитель. К транзистору нужно подвести питание, в частности, создать коллекторный ток, подав небольшое постоянное напряжение на коллектор и совсем небольшое напряжение (смещение) на базу. Нужно включить в коллекторную цепь нагрузку, которой усиленный сигнал отдаст свою мощность (Р-102). Нагрузкой может быть резистор, громкоговоритель, колебательный контур, настроенный на определённую частоту, наконец, входная цепь следующего транзистора — усилитель, как правило, многокаскадный, нужную мощность получают после нескольких последовательных усилений. Мощность эта может быть достаточно большой, десятки и даже сотни ватт, в то время как у входного сигнала — миллионные и миллиардные доли ватта. Мощные выходные транзисторы снабжают радиаторами, так как полупроводниковые структуры не терпят перегрева, для германия предельная температура 70 °С (градусов Цельсия), для кремния 150 °С.

Т-204. **Генератор.** Слабый сигнал на входе усилителя управляет коллекторным током и создаёт, таким образом, усиленный сигнал. Это нормальная, прямая связь входа и выхода, её направление — от входа к выходу. Вернув часть усиленного сигнала из коллекторной цепи обратно на базу, создают обратную связь — от выхода к входу. Здесь, так сказать, возможны варианты. Обратная связь может поддерживать входной сигнал, действовать согласованно с ним — это положительная обратная связь. Обратная связь может действовать против входного сигнала, ослаблять его — это отрицательная обратная связь. Она хоть несколько снижает усиление, но в целом, оказывается, вещь полезная — стабилизирует режим усилителя, уменьшает искажение сигнала в нём.

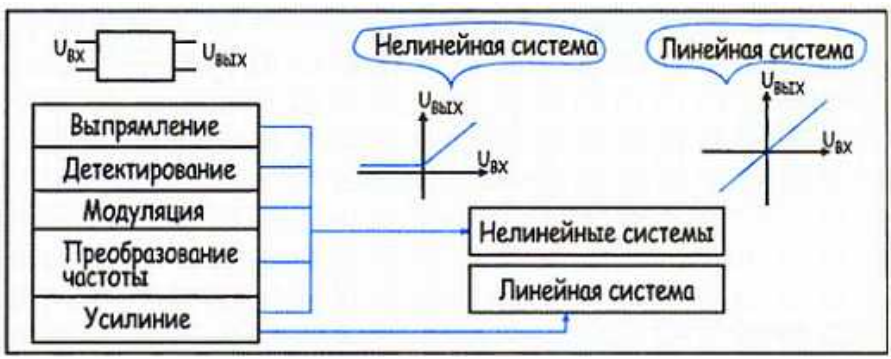
А вот достаточно сильная положительная обратная связь вообще ликвидирует усилитель, превращает его в совсем другое устройство — в генератор.

Представим себе, что на вход транзистора сигнал подаётся с колебательного контура. Контур получил порцию энергии, в нём начались свободные колебания, которые постепенно затухают из-за неизбежных потерь. Но если создать достаточную положительную обратную связь, то она добавит энергию входному сигналу, скомпенсирует потери, и колебания в контуре

станут незатухающими (Р-105). Такой генератор незатухающих колебаний, частоту которых к тому же легко менять (изменяя индуктивность *L* или ёмкость *C* контура), — это жизненно важный электронный блок, например для радиопередатчиков.

Ламповый генератор в своё время в буквальном смысле слова совершил революцию в радиотехнике. До него переменный ток высокой частоты добывали с помощью электрической дуги или искры и даже строили машинные генераторы, выжимая из них частоту до сотни килогерц за счёт сверхбыстрого вращения ротора. Вращать ротор быстрее уже нельзя было, он мог просто разлететься под действием центробежных сил.

Для нынешних транзисторных генераторов, прямых наследников лампового, частота в тысячи, миллионы и даже миллиарды герц — не предел. Когда нужна особо высокая стабильность частоты, LC-контур заменяют кварцевой пластиной. Частота её собственных механических колебаний исключительно стабильна, а эти колебания за счёт физических процессов в кристалле создают на его гранях электрический сигнал, который, как и сигнал с LC-контура, подаётся на вход транзистора.



Р-103. ЛИНЕЙНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ И НЕЛИНЕЙНАЯ. Каждый элемент электрической цепи, с которым мы встречались или будем встречаться, имеет характеристики, рассказывающие о его поведении в той или иной электрической обстановке. Очень простая и часто используемая характеристика — изменение тока, протекающего через данный элемент при изменении подведённого к нему напряжения. На рисунке показаны две такие характеристики — для резистора и для диода. Сразу можно заметить, что характеристика резистора — это прямая линия, в ней нет ни изгиба, ни излома, — чем больше напряжение, тем больше ток, как и

предсказывает закон Ома. Показанная характеристика резистора так и называется «линейная», а вот вторая характеристика (для диода) явно нелинейная, у неё просто излом в районе напряжения равного нулю — меняется полярность напряжения и диод не пропускает тока. Кстати, и у транзистора коллекторный ток растёт с ростом коллекторного напряжения, но в какой-то момент он начинает расти медленней, график тока загибается — в коллекторный ток уже включились почти все свободные заряды, попавшие в базу.

Особенность нелинейной системы в том, что она искажает форму проходящего через неё сигнала так, что в его спектре появляются новые составляющие. Поэтому такие процессы, как выпрямление, модуляция, детектирование, преобразование частоты и другие вообще невозможны без нелинейного элемента. Для выпрямления переменного тока, к примеру, нелинейный элемент должен изменить его спектр, причём так, чтобы в этом спектре появилась постоянная составляющая. В то же время при усилении ничем не скомпенсированная нелинейность недопустима, она приводит к искажениям, которые так и называют нелинейными. Они очень неприятны при воспроизведении звука, особенно музыки, так как слышны в виде новых и совершенно неуместных шумов и хрипов.

Т-205. **Модулятор.** Для радиосвязи, радиовещания, телевизионных передач используют токи высокой частоты (ВЧ). Только они эффективно создают радиоволны, которые переносят сообщения от передатчика к приёмнику. Вместе с тем сами эти сообщения записаны в токах низкой частоты (НЧ). Например, меняющийся ток, который переносит наш голос по телефонной линии, представляет собой электрическую копию звука и, следовательно, имеет тот же частотный спектр — от 200 Гц до 3 кГц. Отсюда задача: нужно сделать высокочастотный сигнал переносчиком низкочастотного. Для этого на передатчике в токе высокой частоты записывают все изменения низкочастотного тока, а в приёмнике извлекают эту запись. Такой процесс записи (в передатчике) — это модуляция, а извлечение записанного (в приёмнике) — детектирование, оба они процессы нелинейные.

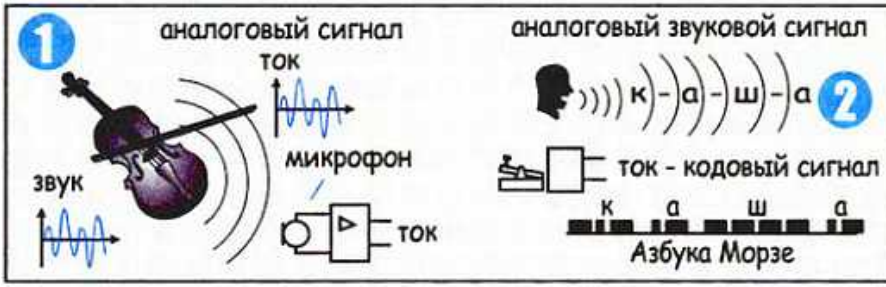
Самая давняя и то же время самая простая — амплитудная модуляция (АМ), когда меняется амплитуда высокочастотного тока, повторяя все изменения низкочастотного сигнала (Р-109).

Существует много схем для амплитудной модуляции, одна из самых простых — усилитель высокой частоты, в котором низкочастотный ток меняет режим транзистора, меняет усиление сигнала. Возможна также и частотная модуляция (ЧМ), её широко используют для высококачественной передачи музыки. Как говорит само название, при ЧМ низкочастотный сигнал записывают в изменениях частоты передатчика. Модулируется для этого сам ВЧ-генератор — при изменении его режима меняются собственные ёмкости транзистора (каждый рп-переход — это своего рода конденсатор), какие-то из них входят в колебательный контур и влияют на частоту его собственных колебаний.

Т-206. **Детектор.** В модулированном по амплитуде высокочастотном токе, который радиоволны наводят в антенне приёмника, нет нужного нам низкочастотного сигнала. Но его можно воссоздать, если принятый модулированный по амплитуде ВЧ-сигнал пропустить через диод (через нелинейную систему, Р-103) и получить таким образом пульсирующий ВЧ-ток. Его среднее значение будет меняться, повторяя изменения амплитуды и формируя низкочастотную составляющую тока — копию того низкочастотного тока, который осуществлял амплитудную модуляцию на передатчике.

Т-207. **Выпрямитель.** Нередко из переменного напряжения нужно получить постоянное, например, для питания электродвигателей постоянного тока, зарядных устройств или электронных схем. Выпрямитель, который во многих предыдущих разделах мы вынуждены были рисовать в виде загадочной коробочки, уже можно представить в виде реальной и весьма простой схемы. Она очень похожа на детектор, но переменное напряжение к выпрямителю подводится не из антенны, а из сети, амплитуда его не меняется, и из получившегося пульсирующего тока фильтры выделяют постоянную составляющую тоже неизменной величины.

Электроника, как и электротехника, богата схемными хитростями, и трудно удержаться, чтобы не назвать здесь одну из них — двухполупериодное выпрямление. Трансформатор со средней точкой или хитрое включение четырёх диодов в мостовой схеме (Р-99) позволяют использовать в выпрямителе оба полупериода переменного тока, что практически вдвое увеличивает мощность выпрямленного тока и облегчает его очистку (Т-8) от переменных составляющих. Мостовые выпрямители используются и в трёхфазных системах.



Р-104. ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ АНАЛОГОВЫХ И ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ. Пришло время, и люди научились разговаривать, перекрывая огромные расстояния. Микрофон довольно точно делал своего рода электрическую копию звука (1), то есть делал очень похожий на звук (аналогичный ему) электрический сигнал (почему-то принято говорить аналоговый), который пробегал сотни и тысячи километров. А затем электромагнитный громкоговоритель из принятого аналогового электрического сигнала делал точно такой же звук, какой воздействовал на микрофон. Система передачи речи и музыки с помощью аналогичного звуку (аналогового) сигнала применялась и применяется в телефонии, радиовещании, телевидении, звукозаписи, но в 1838 году у неё появился серьёзный конкурент. Он, как и в книгах или юридических документах, отображал слова буквами с помощью несложного кода (азбука Морзе) превращали их в электрические сигналы — в известные всем заинтересованным лицам комбинации коротких («точки») и продолжительных («тире») импульсов тока (2). В наше время мир заполнен сложными электрическими и электронными системами и аппаратами, работающими с информацией в кодовом её представлении. Чаще всего информация кодируется двоичными числами, то есть состоящими из единиц и нулей, например, из импульсов тока (1) и пауз (0). Кодовое представление информации имеет много достоинств. В частности, закодированный цифрами сигнал можно математически обрабатывать, в телевидении, например, такая обработка позволяет в несколько раз уменьшить участок спектра, необходимый для передачи картинки.

Т-208. **Преобразователь частоты и идея супергетеродинного приёмника.** Промелькнувшие электронные блоки: генератор, модулятор, детектор, выпрямитель — всё это нелинейные системы (Р-103), и за счёт нелинейных рабочих характеристик диодов или транзисторов в них идут нелинейные процессы. Только такому блоку, как усилитель, нелинейность не нужна, она искажает усиливаемый сигнал. А все остальные блоки работают только за счёт своей нелинейности — создают в спектре сигнала новые составляющие, которые и выполняют какое-либо специальное задание: превращение переменного тока в постоянный, модуляцию высокочастотного сигнала, детектирование, а также преобразование частоты в супергетеродинном приёмнике (Р-111). Исследуя в этой нелинейной системе спектр двух переменных токов, например с частотами 50 и 60 кГц, мы кроме их гармоник обнаружим две очень странные составляющие спектра — одну с частотой 110 кГц, а другую с частотой 10 кГц. Откуда они появились? Ни в один ряд гармоник эти частоты не попадают. Кем же тогда рождены эти странные частоты? Оказывается, что это составляющие с суммарной частотой 50 кГц + 60 кГц = 110 кГц и разностной 60 кГц — 50 кГц = 10 кГц. Почему появились в спектре составляющие с этими странными частотами? Их предсказала математика, и их можно живьём обнаружить в спектре, настроив на них резонансный контур. Более того, получение разностной частоты используется во всех радиоприёмниках супергетеродинного типа, а это приёмники видеосигналов в телевизорах, домашние и походные приёмники, радиолы, приёмники сотовых телефонов, радиотелескопов, локаторов и множества других устройств.

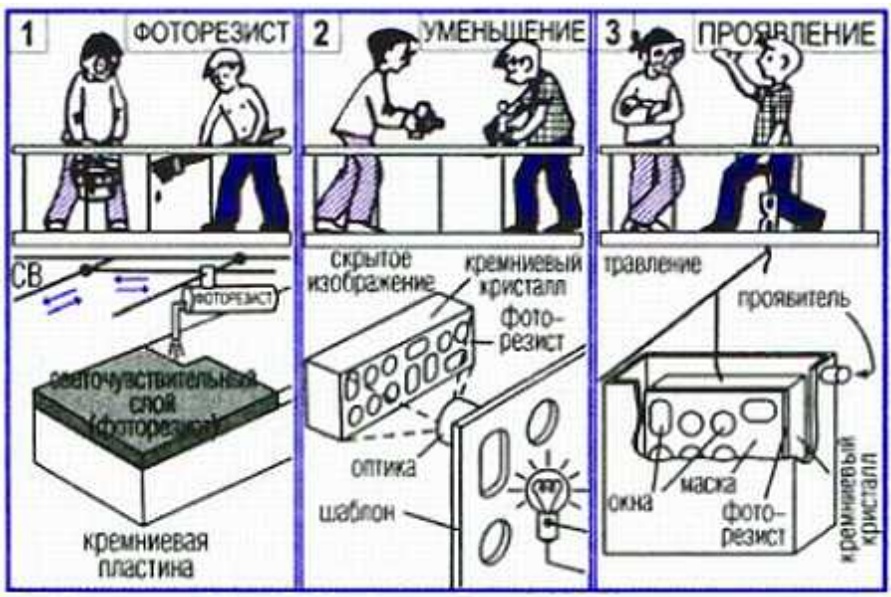
С помощью такого преобразования очень высокие частоты, которые усиливать сложно, преобразуют в более низкую промежуточную частоту и уже на ней ведут усиление принятых сигналов. После преобразования сигнал промежуточной частоты $f_{пр}$ оказывается точно так же промодулированным, как и сам сигнал принимаемой станции с частотой *f*с. Поэтому продетектировав промежуточную частоту, вы услышите то же самое, что было бы при детектировании самого принимаемого сигнала с частотой *f*с.

Т-209. **Строительные блоки для цифровых схем.** Электрические импульсы цифровых сигналов усиливают в ламповых или транзисторных усилителях, в принципе похожих на аналоговые, модулятор, если нужно, нагружает импульсами высокочастотный ток, а детектор извлекает импульсы из модулированного сигнала. Вместе с тем у цифровых сигналов

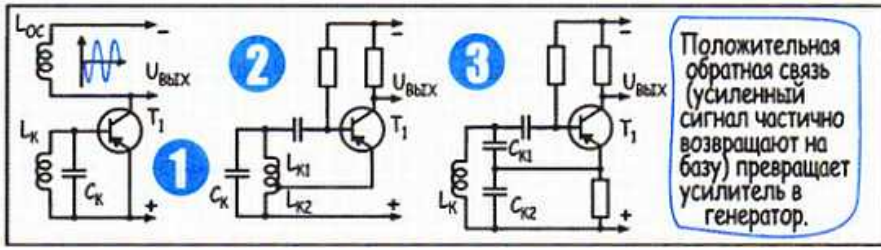
есть несколько своих особых схемных решений, есть несколько схем и блоков, которые можно встретить в цифровых аппаратах самого разного назначения.

Т-210. **Ограничитель.** Если на аналоговый сигнал в пути «налипнет» какая-нибудь помеха, какой-нибудь посторонний ток, то от него уже не избавишься, и вместо слова «красота» ваш телефонный собеседник вполне может услышать «кароста». С цифрового сигнала помеху можно просто срезать с помощью ограничителя, в простейшем случае он собран из диодов с запирающими постоянными напряжениями.

Ограничители применяют и в аналоговых устройствах с частотной модуляцией, поскольку в этом случае, в отличие от модуляции амплитудной, несколько срезать амплитуду сигнала не опасно. В значительной мере благодаря имеющимся в приёмнике ограничителям помех, радиопередачи с частотной модуляцией отличаются высоким качеством.



ВК-252. *Все последующие этапы есть последовательное изготовление интегральной схемы в кристалле. Для начала его покрывают тонким светочувствительным слоем — фоторезистом (1). Затем через шаблон маски при сильном уменьшении на фоторезист направляют свет (2), и на нём появляются микроскопические освещённые точки. Именно в этих точках свет меняет вещество фоторезиста, и после проявки (3) в маске образуются отверстия, открывающие доступ к кристаллу.*



Р-105. УСИЛИТЕЛЬ ПРЕВРАЩАЕТСЯ В ГЕНЕРАТОР. Для начала возьмём типичный усилительный каскад, у которого во входную цепь включён колебательный контур $\mathbf{L_кC_к}$ (1). А в коллекторную цепь включена катушка $\mathbf{L_{ос}}$ — обозначение «ос» означает «обратная связь». Катушки $\mathbf{L_к}$ и $\mathbf{L_{ос}}$ находятся на одном каркасе и связаны общим магнитным полем, благодаря которому часть энергии из коллекторной цепи возвращается в базовую. Такая передача энергии как раз и есть обратная связь, прямая связь — это влияние базовой цепи на коллекторную через коллекторный ток в транзисторе. Если в контур $\mathbf{L_кC_к}$ попадёт какая-нибудь порция энергии, если, например, от батарейки зарядить конденсатор $\mathbf{C_к}$, то в контуре возникнут свободные колебания. Они, правда, быстро прекратятся — энергия, полученная от батарейки, будет израсходована на преодоление потерь. Но если контур включён в нашу схему и связан с катушкой $\mathbf{L_{ос}}$, то за счёт полученной от неё энергии потери в контуре могут быть скомпенсированы и колебания будут продолжаться вечно — усилитель превратится в генератор. При этом, разумеется, обратная связь должна быть положительной — она должна поддерживать контурный ток. Если же обратная связь окажется отрицательной (то есть будет ослаблять сигнал в контуре), то её нужно просто сдвинуть по фазе на 180°, для этого проще всего поменять местами (перепаять) выводы катушки или катушки $\mathbf{L_к}$. Ну а если обратная связь слишком слабая, то нужно сблизить эти катушки. Две следующие схемы отличаются от первой прежде всего тем, что в них нет отдельной катушки $\mathbf{L_{ос}}$ и напряжение обратной связи снимается с части контурной катушки (2) либо с части контурной ёмкости (3), которая в данном случае образована двумя последовательно соединёнными конденсаторами $\mathbf{C_1}$ и $\mathbf{C_2}$. Их общая ёмкость «меньше

наименьшей», она вычисляется по такой же примерно формуле, как общее сопротивление двух параллельно соединённых резисторов («произведение на сумму»).

Ламповые генераторы появились в 1913 году и, по сути дела, не изменяясь, пришли в наше время. Они открыли новую эпоху получения высокочастотных токов, которые до этого извлекали из электрической искры или дуги, а также пытались получить от специальных быстроходных машинных электрогенераторов.

Т-211. **Генератор импульсов — мультивибратор.** Взяв за основу переменное напряжение с кварцевого генератора, сделав из него с помощью диода пульсирующий ток, обработав этот ток ограничителями и фильтрами, можно получить бесконечную последовательность высокостабильных прямоугольных импульсов тока и из них с помощью шифратора формировать нужные цифровые сигналы. Но есть генераторы, которые сразу выдают импульсный ток. Один из самых простых таких импульсных генераторов — мультивибратор (Р-117), радиолюбители часто используют его в самодельных музыкальных инструментах и переключателях ёлочных гирлянд. В мультивибраторе два транзистора, коллектор каждого связан с базой соседа, причём так, что транзисторы поочередно друг друга открывают и в коллекторной цепи каждого поочередно появляются импульсы тока. Подбором резисторов и конденсаторов частоту импульсов можно менять в широких пределах — от долей герца до многих килогерц.

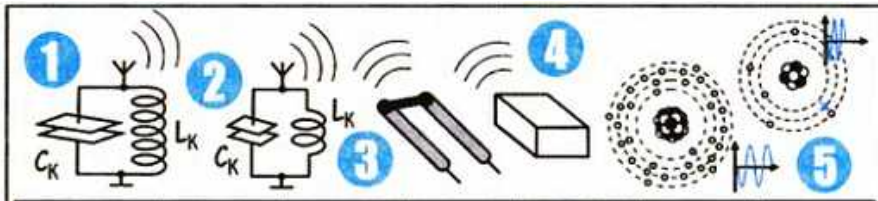
Т-212. **Триггер: делитель на два и элемент, запоминающий один бит — минимальную порцию информации.** Триггер — один из самых популярных схемных элементов вычислительной техники, в нём тоже два транзистора (как минимум), и коллектор каждого, так же как в мультивибраторе, связан с базой другого. Но схема связи иная, и режим триггера совсем иной — транзисторы тоже открываются поочерёдно, но не самовольно, как в мультивибраторе (Т-8), а только по указанию внешнего пускового импульса, поступающего на общий вход. Иными словами, под действием входных импульсов транзисторы открываются через такт или, иначе говоря, делят на два частоту входных импульсов. Так, например, если входные импульсы следуют с частотой 1000 герц, то есть на входе появляется 1000 импульсов в секунду, то каждый из транзисторов триггера, открываясь через такт, будет выдавать в секунду 500 импульсов коллекторного тока. Соединив

последовательно несколько триггеров, можно делить частоту входных импульсов на 2, 4, 8, 16 и так далее (Р-118), а это уже некая математическая квалификация.

Из нескольких триггеров можно собрать ячейку памяти для запоминания цифрового сигнала в виде любой комбинации импульсов и пауз. Сразу заметим, что один импульс («единица») или одна пауза, то есть отсутствие импульса на своём месте («ноль»), есть минимальная порция передаваемой информации. Называется эта порция бит, от объединения английских слов «байнэри диджит» (binary digit) — «двоичный знак». Более крупную единицу 1 Байт = 8 бит можно записать в ячейку памяти из восьми триггеров.

***Т-213.* Элементы логики — схемы *И, ИЛИ, НЕТ*.** Эти три очень простые схемы называют электронными логическими элементами, поскольку они в электрическом варианте выполняют три известные операции математической логики: И, ИЛИ, НЕТ, последнюю операцию иногда называют НЕ (Р-120). Так схема И сработает, то есть выдаст выходной импульс тока, только в том случае, если импульсные сигналы одновременно придут и на первый её вход, и на второй. Схема ИЛИ сработает от одного импульса, поступившего на любой из её входов: или на первый, или на второй. Наконец, схема НЕТ (НЕ), пропуская через себя входные импульсы, делает всё наоборот: при появлении входного импульса она не выдаёт импульс на своём выходе, а не получая на вход импульсы, не обращает на это никакого внимания (Т-8) и выдаёт импульсы на выходе. Иными словами, если подать 1 на вход схемы НЕТ, то на её выходе будет 0, а если подать на вход 0, то на выходе будет 1.

Схемы И, ИЛИ, НЕТ, особенно в сочетании с другими электронными цифровыми блоками, выполняют весьма сложные логические и математические операции. Простой и наглядный пример — одноразрядный сумматор.



диапазон	радио	инфра-красные лучи	видимый свет	ультра-фиолето-вый свет	рентген	гамма лучи
длина волны λ	10км - - 1 мм	1 мм - - 780 нм	780 нм - - 380 нм	380 нм - - 10 нм	1 нм - - 5 пм	менее 5 пм
частота F	30кГц - -300 ГГц	300 ГГц- -429 ГГц	429 ГГц- -750 ГГц	$7{,}5\cdot10^{14}$Гц- - $3\cdot10^{16}$ Гц	$3\cdot10^{16}$Гц- - $6\cdot10^{19}$ Гц	более $6\cdot10^{19}$ Гц

Р-106. ГЕНЕРАТОРЫ: ОТ КОНТУРА С БОЛЬШОЙ КАТУШКОЙ ДО АТОМА. В каждом радио-, телевизионном или ином передатчике обязательно есть транзисторный или ламповый генератор, с которого всё начинается, его поэтому часто называют задающий генератор. Именно он определяет (задаёт) частоту, на которой передатчик работает, то есть излучает радиоволны. Для самых низких частот длинноволнового диапазона (1) в задающем генераторе нужен контур $\mathbf{L_КC_К}$ с очень большой индуктивностью катушки (ёмкость конденсатора увеличивать не стоит, при этом снижается добротность, Р-112) — возможно, в ней будет несколько сотен или даже несколько тысяч витков. По мере повышения рабочей частоты (переход на более короткие волны) индуктивность катушки будет уменьшаться и на коротких волнах в ней может остаться всего 3–5 витков (2). Когда уменьшение индуктивности становится сложным или нецелесообразным, в качестве резонансной системы часто используют короткозамкнутую двухпроводную линию длиной примерно $^1/_4$ А длины волны (3). А для ещё более коротких волн вместо колебательного LC-контура применяют объёмный резонатор (4). В нём возникает резонанс на частоте, которая зависит от размеров и формы резонатора. Уже в диапазоне инфракрасных и более коротковолновых (более высокочастотных) излучений пользуются излучателями и резонаторами, которые сконструировала и изготовила сама природа, — молекулами и атомами. При изменении их запаса энергии они излучают порцию электромагнитных волн строго определённой частоты

(5) — длина волны в этом случае измеряется миллиметрами, микронами и нанометрами.

Т-214. **Сумматор — представитель рассуждающей электроники.** Одна из профессий цифрового сигнала — с его помощью выполняются математические операции, производятся вычисления. При этом используется двоичная система представления чисел вместо привычной десятичной. В десятичной системе есть десять разных цифр: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9. При этом дальнейший счёт после девяти, например 9 + 1, сопровождается переходом в следующий разряд 9 + 1 = 10. В двоичной системе всего две цифры 0 и 1, поэтому во второй разряд переходят уже при операции 1 + 1 = 10. То есть двоичное 10 — это наше десятичное 2, десятичное 3 — это двоичное 10 + 1 = 11, десятичное 4 — это двоичное 11 + 1 = 101 и так далее. Запись получается более громоздкой, но зато всего два знака 1 и 0, которые можно отобразить любым электрическим импульсом и паузой, легко выполняя с комбинациями сигналов 1 и 0 множество логических и арифметических операций. Чтобы вместо двоичной системы перейти на десятичную, пришлось бы ввести десять разных по величине импульсов, а это невероятно усложнило бы электронные схемы. Между тем тот факт, что электронная математика работает в двоичной системе, нисколько не мешает нам пользоваться десятичной — сами же электронные схемы мгновенно переводят десятичное число в двоичное или, наоборот, двоичное в десятичное.

Посмотрим, как работает электронная арифметика, на примере простейшего сумматора, выполняющего четыре варианта сложения 1 и 0, а именно: 0 + 0 = 0; 0 + 1 = 1;1 + 0 = 1 и 1 + 1 = 10 (Р-121). В сумматоре четыре логических элемента, первые три операции они выполняют сравнительно легко, с четвёртой сложнее, нужно записать 1 в следующий (второй) разряд, а в первом поставить 0, поскольку при двоичном счёте 1 + 1 = 10. В дело вступает элемент НЕТ (НЕ), который в первых трёх операциях получал на свой вход 0 и, делая всё наоборот, посылал 1 на вход И1, помогая ему во второй и в третьей операциях выдать 1. В операции 1 + 1 у элемента НЕТ (НЕ) на входе наконец появляется 1, и, естественно, он выдаёт 0. Поэтому И1 сработать не может, и в первом разряде появляется нужный 0. Одновременно, получив 1 на оба входа, срабатывает И2 и посылает 1 во второй разряд.

Из подобных рассуждающих (Т-8) блоков собираются очень сложные электронные системы для работы с цифровой

информацией, в том числе самая квалифицированная система — микропроцессор. О его способностях косвенно говорит то, что в современном микропроцессоре сотни миллионов и даже миллиарды таких блоков, как сумматор.

Т-215. **Шифратор и дешифратор.** Построив собственную линию цифровой телеграфной связи, её создатели могут договориться и ввести у себя любую систему кодирования. Например, букву А кодировать двумя импульсами (11), букву Б — тремя (111), букву В — двумя импульсами с паузой между ними (101) и так далее. Но в мире существует несколько стандартов кодировки, ими пользуются в технике связи и в персональных компьютерах. Основа практически всех стандартов восьмибитовый сигнал, то есть байт — различные комбинации из восьми импульсов или пауз. Таких комбинаций может быть 28 = 256, то есть байт может закодировать (снабдить условными обозначениями, кодами) 256 букв, цифр, знаков препинания, вспомогательных команд, например, «перейти на большие буквы» или «стереть». Вы нажимаете нужную клавишу на клавиатуре, особая схема по имени шифратор мгновенно формирует соответствующую восьмибитовую шифровку, и по восьмипроводной линии посылает её дальше. Сырьё для этих шифровок даёт тактовый генератор, из него импульсы тоже по восьмипроводной линии входят в шифратор. Но только в шифратор импульсы входят по всем восьми проводам, а из него выходят лишь по некоторым — в зависимости от того, какая нажата клавиша, какой ей соответствует код.

В месте приёма обратную задачу решает дешифратор. В него один за другим приходят восьмибитовые «залпы», дешифратор распознаёт записанную в них комбинацию импульсов и пауз и тут же определяет, что именно зашифровано в данной комбинации. В каких-то случаях дешифратор может, распознав шифры, сразу изобразить на экране соответствующие им буквы, цифры или знаки. А ещё результат расшифровки дешифратор может направить принтеру, и тот отпечатает расшифрованный текст. Системы «шифратор-дешифратор» автоматически, безошибочно и очень быстро распознают в полученных байтах адреса и направляют информацию в нужные отделы памяти или извлекают её из нужных отделов, направляют в нужные отделы микропроцессора посланные ему определённые команды, одним словом, используются очень широко (Р-119). В данном случае, думается, очень важно подчеркнуть слова «автоматически, безошибочно и очень быстро».

электромагнитное поле
скорость 300 000 км/с
свободные электроны
0,5 мм/с
Сами свободные электроны, создающие электрический ток, перемещаются в проводнике очень медленно, но электромагнитное поле мчится вдоль проводов со скоростью света и заставляет свободные заряды двигаться практически сразу во всей цепи.

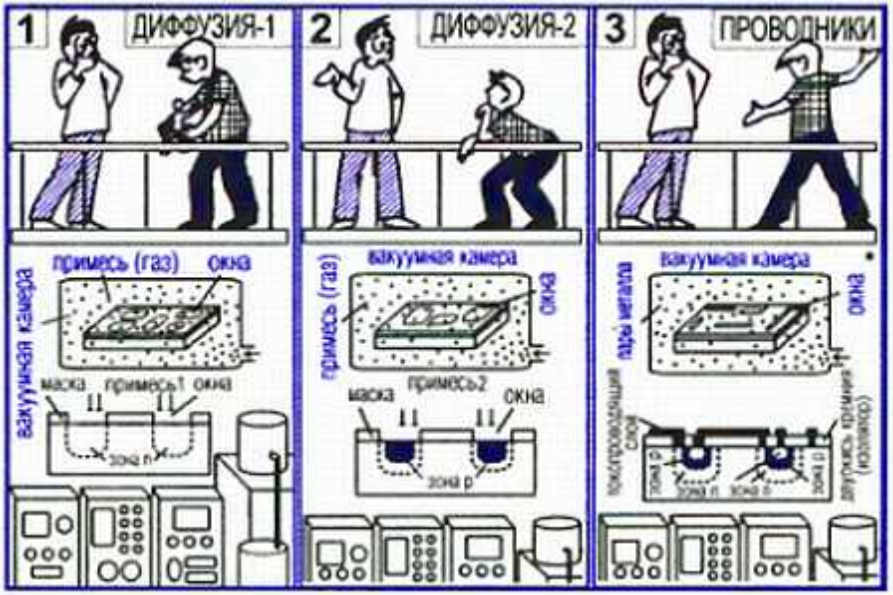
Р-107. ЭЛЕКТРОНЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ТОКЕ ДВИЖУТСЯ ОЧЕНЬ МЕДЛЕННО, НО САМ ТОК ПРОДВИГАЕТСЯ ОЧЕНЬ БЫСТРО. Приближаясь к окончанию книги, хотелось бы напомнить, что в ней очень многое рассказано упрощенно и далеко не полно. У читателя есть возможность дополнить это упрощённое изложение с помощью других популярных книг или журнальных статей. В качестве примера приводим короткий рассказ о некоторых ещё не освещённых в книге особенностях электрического тока.

Если проводник никуда не подключён, то свободные электроны в нём беспорядочно движутся в разные стороны и в среднем проходят очень небольшие расстояния при каждом таком движении. Об их активности говорит температура проводника — чем она выше, тем активнее хаотическое движение свободных частиц, оно прекращается только при температуре абсолютного нуля, то есть примерно при температуре минус 273 градусов Цельсия. Если подключить проводник к какому-либо источнику постоянного напряжения, например к гальваническому элементу или батарейке, то к этому хаотическому движению электронов добавится некоторое их смещение под действием электрического напряжения источника — реально от «минуса» к «плюсу» и условно в противоположном направлении. Это смещение и есть электрический ток, который движется с очень низкой скоростью — сантиметры и даже миллиметры в секунду. Однако представление о том, что электрический ток

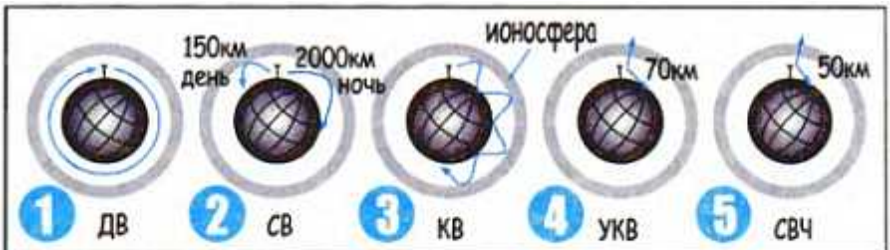
движется по проводам очень быстро, совершенно справедливо. Оно связано с тем, что при подключении к источнику напряжения его электрическое поле распространяется вдоль проводной линии со скоростью света (300 000 километров в секунду). При этом движение зарядов, которое мы называем «электрический ток», начинается практически сразу во всём проводнике. Реальное представление об этой высокой скорости распространения тока можно получить, отмечая время отправки и прибытия электрического сигнала, пробегающего тысячи километров за какие-то доли секунды, например, в сети Интернета или по линии междугородного телефона.

Т-216. **Преобразование аналогового сигнала в цифровой и цифрового в аналоговый.** Желание воспользоваться достоинствами цифровых систем, в частности, их помехозащищённостью, привело к тому, что аналоговый сигнал преобразуют в цифровой, производят с ним необходимые операции (например, пересылают на огромные расстояния) и вновь превращают в аналоговый. Один из хорошо всем известных примеров — компакт-диски CD и DVD. На них в цифровом виде записана музыка, которая по своей природе изначально была представлена аналоговым сигналом — непрерывно меняющимся звуковым давлением. А поскольку слушаем мы тоже не «цифру», а старый добрый аналоговый звук, то прочитанную с диска цифровую запись в музыкальном центре или в приёмнике превращают в аналоговый электрический сигнал, который в итоге отдают громкоговорителям.

Главную работу выполняют два непростых, но теперь уже недорогих электронных блока — аналогово-цифровой преобразователь, сокращённо АЦП, и цифро-аналоговый преобразователь, ЦАП. Первый из них — это фактически шифратор, он много тысяч раз в секунду измеряет уровень аналогового сигнала и каждый раз формирует кодированный цифровой сигнал, принятый для измеренного уровня. Второй преобразователь, ЦАП, — дешифратор. Получив цифровой сигнал, он создаёт соответствующее этому коду мгновенное значение аналогового сигнала. Примерно то же самое происходит и в других аналогово-цифровых системах, в том числе в цифровых сотовых телефонах. В звукозаписи на CD цифровые сигналы 23-битные, это позволяет закодировать несколько миллионов разных уровней звука, то есть очень точно записать его в цифровом виде.



ВК-253. *Кристалл помещают в вакуумную камеру (изолированную от внешней среды), в неё также вводится газообразная примесь, которая должна попасть в кристалл сквозь отверстия данной маски (1). Весь цикл операций, как правило, повторяют несколько раз (2) с разными масками и разными примесями и в поверхностном слое кристалла создают сложную схему. В итоге на поверхности кристалла формируют тончайшую проводниковую цепь (3).*



диапазон	длина волны λ	частота F	применение
Длинные волны ДВ	2000 м - 6000 м	15 кГц - 150 кГц	Научные исследования
Средние волны СВ	100 м - 2000 м	150 кГц - 3 МГц	Радиовещание
Короткие волны КВ	10 м - 100 м	3 МГц - 30 МГц	Радиовещание, связь
Ультракороткие волны УКВ	1 м - 10 м	30 МГц - 300 МГц	Радиовещание ЧМ, ТВ
Дециметровые волны ДМВ	10 см - 1 м	300 МГц - 3 ГГц	ТВ, сотовая связь
Сантиметровые волны СВЧ	1 см - 10 см	3 ГГц - 30 ГГц	ТВ, связь, локация
Милиметровые волны СВЧ	1 мм - 1 см	30 ГГц - 300 ГГц	связь, локация

Р-108. РАДИОСИГНАЛ, ОТРАЖЁННЫЙ ОТ КОСМИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА. Известно, что очень длинные радиоволны (ДВ) хорошо перекатываются через все земные неровности и даже огибают саму нашу шарообразную планету (1). Именно поэтому много лет назад первые голландские и английские радиостанции, работая в диапазоне длинных волн, поддерживали телеграфную связь с колониями, расположенными в районе Индонезии и Австралии. Станции средних волн (СВ) земную поверхность уже не огибают, и их можно услышать на расстоянии 100, в лучшем случае 200 километров. Можно ли из этого сделать вывод, что с увеличением частоты дальность передачи уменьшается? Оказывается, нельзя. Известно, что некоторые СВ-передатчики в ночное время слышны на расстояниях, измеряемых тысячами километров. Дело в том, что ночью высоко в атмосфере образуется слой с большим количеством ионов, и от этого слоя, как от зеркала, отражаются средние радиоволны, попадая на территории, удалённые от передатчика. Аналогично короткие волны (КВ), отражаясь от сильно

ионизированных слоёв атмосферы (ионосферы), круглые сутки могут быть слышны на любом отдалении от места передачи (3). Много лет назад короткие волны, как диапазон ближнего действия, за ненадобностью были отданы радиолюбителям. Они-то и обнаружили дальнее распространение КВ, приняв в Европе американские передатчики. Все остальные диапазоны после КВ, которым отданы более короткие радиоволны, — это диапазоны ближнего действия. От ионосферы они не отражаются, а легко проходят сквозь неё и отправляются куда-нибудь на Марс или подальше. Реальный способ расширить зону действия этих передатчиков — установка передающих антенн на крыше очень высокого здания или на высокой металлической мачте. Диапазон ближнего действия это, с одной стороны, конечно, плохо, но, с другой стороны, хорошо. Если зона действия передатчика ограничена сотней километров, то на расстоянии 200 километров можно строить такой же передатчик и отдать ему те же рабочие частоты — передатчики мешать друг другу не будут. Ну а в каком-нибудь особом случае, когда, например, местная передача имеет мировое значение, её можно перебросить куда угодно по радиорелейной линии или через спутник-ретранслятор.

Т-217. **Миллион профессий электроники.** Перед нами промелькнуло десятка полтора схемных блоков, которых наверняка существуют тысячи и которые, собираясь огромными компаниями (Т-8), создают совсем уже бессчётное множество электронных схем, приборов, аппаратов, методов и систем. Иногда полезно коротко вспомнить хотя бы о некоторых из них.

Т-218. **Радио: из частотной хижины в дворцы.** Когда диктор объявляет: «Наша радиостанция работает на частоте 400 килогерц», — он не говорит вам всей правды. Модуляция — процесс нелинейный и сопровождается появлением в спектре новых составляющих. Это боковые частоты, они выше и ниже, чем основная, несущая частот передатчика (Р-109), который реально излучает в эфир не одну частоту, а полосу частот и её обязательно нужно доставить в приёмник. При этом ширина полосы зависит от модулирующего сигнала: при АМ для музыки нужна полоса 20 кГц, при ЧМ — 150–200 кГц, для телевидения — более 6 МГц. Передатчики, чтобы не налезать друг на друга, должны соблюдать частотный интервал, и в любом диапазоне, не

мешая друг другу, может работать ограниченное число радиостанций.

Первые несколько десятилетий для радио использовались лишь диапазоны средних и длинных волн (ДВ и СВ), в которых имеется «частотная жилплощадь» примерно для сотни радиовещательных станций. В начале в мире работало всего несколько радиопередатчиков, но вскоре жизнь радистов уже во многом определял термин теснота в эфире. Заметно улучшили дело короткие волны (КВ), и совершенно новые возможности появились, когда инженеры создали приборы и схемы, работающие на метровых (МВ или УКВ), дециметровых (ДМВ) и сантиметровых волнах, или, иначе, на сверхвысоких частотах (СВЧ). Это огромные частотные дворцы (Т-8), только в одном СВЧ-диапазоне, не мешая друг другу, могли бы работать 30 миллионов радиовещательных станций или 5 тысяч телецентров, в то время как во всём объединённом ДВ-, СВ-диапазоне не хватит места даже для одной ТВ-программы. Если бы не новая сверхвысокочастотная радиоэлектроника, не видать бы нам ни телевидения, ни современной радиолокации, ни сотовых телефонов.

Каждая радиостанция работает на своей частоте, настроив на неё приемник можно выделить нужную программу. Станции с амплитудной модуляцией (АМ) обычно излучают полосу частот 20 кГц и на столько же разнесены их несущие частоты. Станции с частотной модуляцией (ЧМ) занимают значительно большую полосу и их частоты отстоят на 200 кГц и более.
1
УВЧ
АД
УНЧ
2
УВЧ
ЧД
УНЧ
3
АМ
ЧМ
20 кГц
200 кГц

Р-109. ЧАСТОТНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ КАНАЛОВ. Честно признавшись в невозможности в этой книге об электричестве достойно поговорить об электронике (Т-9), автор всё же пытается в самых общих чертах сказать о ней несколько слов. Сейчас речь о том, что радиовещательные станции в основном работают в двух диапазонах — на средних и ультракоротких волнах. В первом из этих диапазонов (1) частотная территория мала (от 530 до 1700 кГц, то есть всего 1170 кГц). Поэтому станции работают здесь с экономной амплитудной модуляцией (сокращенно АМ, обычно

средневолновый радиовещательный диапазон тоже так называют), и каждая занимает полосу частот 20 кГц. Вообще-то в АМ-диапазоне узаконенное расстояние между несущими частотами $\mathbf{f_н}$ соседних станций примерно 10 кГц, но стараются, чтобы близкие по частоте станции находились подальше одна от другой и не очень мешали друг другу. Благодаря этому станции излучают несколько более широкую полосу и обеспечивают не очень высокое, но всё же приемлемое качество звучания. В диапазоне ультракоротких волн (2) частотная территория значительно больше (от 76 000 до 90 000 кГц, то есть всего 14 000 кГц, в 12 раз больше, чем в АМ-диапазоне). Поэтому станции могут работать здесь с менее экономной, но более совершенной частотной модуляцией (сокращённо ЧМ, обычно ультракоротковолновый радиовещательный диапазон тоже так называют) и занимать значительно более широкую полосу частот. Это позволяет использовать особые средства и схемы для подавления помех и значительно более высокого качества звучания. Приёмники для АМ- и ЧМ-диапазонов (1,2) во многом похожи, но детекторы у них, конечно, разные. Один из них выделяет низкочастотный сигнал, работая с изменениями амплитуды (1). Другой детектор выделяет низкочастотный сигнал, работая с изменениями частоты (2). В приёмниках с диапазонами АМ и ЧМ есть два переключаемых детектора.

В заключение хочется заметить, что распределение рабочих радиочастот и контроль их использования в наше время дело особо сложное и ответственное. Достаточно вспомнить о таких потребителях рабочих частот, как гражданская авиация и вооруженные силы.

***Т-219*. СВЧ — совсем другая радиотехника.** Для сверхвысокочастотных диапазонов пришлось создавать принципиально новую технику. Вместо вакуумного триода применили мощный электромагнитный генератор магнетрон. Настроенный на определённую частоту колебательный LC-контур превратился в медный цилиндр строго определённых размеров. Кабель стал металлической трубой по имени волновод. Высоко поднятый провод антенны заменил маленький излучатель с рефлектором в виде тарелки, которую мы сегодня видим довольно часто.

Т-220. **Наследники первой электрической профессии.** Имея в виду единую природу электричества и магнетизма, можно сказать, что первым практическим применением электромагнетизма был компас. Его нынешние наследники — системы радионавигации, они позволяют экипажу самолёта, корабля или даже одинокому путешественнику с высокой точностью оценить своё направление и, более того, свои координаты. Сегодня без локаторов и радионавигационных приборов самолёты не летают и моряки не выходят в море, а для военных это вообще техника жизни — была бы в своё время у американцев радиолокация, не случился бы у них Пёрл-Харбор. В принципе локатор работает очень просто: он посылает в пространство короткие импульсы радиоволн и тут же переключается на приём. Если через какое-то небольшое время посланный сигнал возвращается, значит, он отразился от какого-то объекта, расстояние до него можно определить по запаздыванию отражённого сигнала.

И радионавигация в принципе тоже дело несложное. Антенна в виде вертикального провода одинаково хорошо принимает радиоволны со всех направлений, а есть антенны направленные, они как бы усиливают сигналы, которые приходят с главного для них направления. Вращая такую антенну в горизонтальной плоскости, можно по максимуму сигнала найти направление на радиомаяк — специальный радиопередатчик с точно известным местонахождением. А принимая поочерёдно два разных маяка, можно в точке пересечения двух направлений получить свои собственные координаты. Примерно так же по сигналам, принятым со спутника, электронный блок может точно вычислить ваши координаты и привязать их к одной из карт местности, которая хранится в памяти вашего небольшого навигационного аппарата.

В принципе, в общих чертах всё это действительно очень просто, но понадобилась сложная аппаратура и, конечно, годы напряженного труда учёных и инженеров, чтобы получить то, что сегодня умеют радионавигация и радиолокация.

Т-221. **Сотовый телефон — важный шаг к всеобщей связи.** Отметив, что в СВЧ-диапазоне могло бы работать 30 миллионов радиовещательных станций, мы очень сильно приуменьшили реальную цифру. Дело в том, что радиоволны короче нескольких десятков метров, в отличие от длинных волн, не огибают земной поверхности, не проходят за линию горизонта. Поэтому радиостанции, отдалённые на 100 километров, спокойно могут работать в сантиметровом диапазоне на одной и той же частоте, не мешая друг другу.

Это бесспорное достоинство на протяжении многих лет больше огорчало, чем радовало: сверхкороткие радиоволны были диапазоном только близкого действия, их можно было принять лишь на расстоянии, как принято говорить, прямой видимости. Но и этот непоправимый, казалось бы, недостаток сумела преодолеть инженерная настойчивость. На сотни и тысячи километров протянулись радиорелейные линии связи, где СВЧ-радиосигнал, как эстафету, передают от одного ретранслятора к другому. Этот сигнал может переносить тысячи телефонных разговоров, каждый на своей поднесущей частоте. Такой же многоканальный сверхвысокочастотный сигнал научились передавать по специальному кабелю со встроенными усилителями. Появились спутники-ретрансляторы, вращаясь синхронно с Землей, они на высоте около 36 тысяч километров постоянно висят над каким-нибудь большим регионом и снабжают его телевизионными программами, которыми регионы делятся друг с другом без всяких проблем.

Наконец, ещё одно новшество, без которого непонятно, как мы обходились раньше. Несколько лет назад стал доступным и очень распространённым сотовый радиотелефон (Р-115). Размещённые в его корпусе миниатюрные радиоприёмник и радиопередатчик тоже работают на СВЧ и поддерживают связь с мощными приёмопередатчиками, которые благодаря высоко поднятым антеннам обслуживают довольно большой район. Через этот мало кому знакомый центр связи ваш сотовый аппарат попадает на главную телефонную станцию города, к другим владельцам сотовых телефонов, а если нужно, то и в какую-либо далёкую страну.

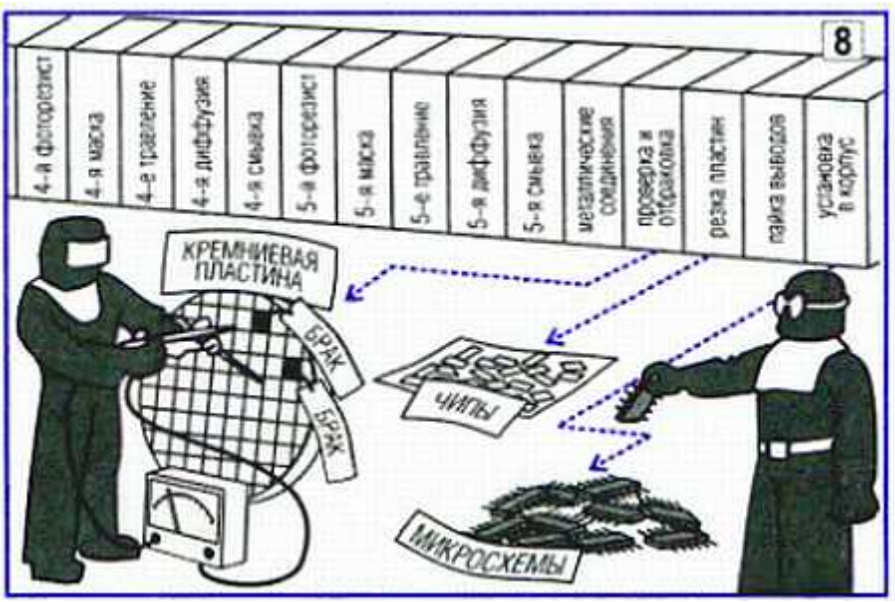
Ещё не так давно как об очень далёком будущем специалисты говорили о всеобщей связи, о возможности каждого человека немедленно связаться с любым другим человеком на Земле. Достижения радиоэлектроники последнего времени, в частности, сотовый телефон, быстро продвигают эту мечту к реальности, и цель уже не за горами.

Р-110. ВРЕМЕННОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ КАНАЛОВ. Рисунок поясняет совершенно иную систему разделения каналов — временную (ударение на «у»), то есть по времени появления передаваемого и принимаемого сигналов. Предполагается, что каждая из пяти программ передаётся быстро следующими друг за другом малыми порциями 1, 2, 3, 4, 5. Слушатель переключателем П1 выбирает нужную ему программу (в нашем примере это программа 2), подключившись к одному из пяти неподвижных контактов. В месте приёма автомат тут же запоминает нужное положение выключателя П2 (в нашем примере, напоминаем, это положение 2), и после этого электронные переключатели ЭП1 и ЭП2 будут включать всю линию связи только в те моменты (лучше бы сказать «мгновения»), когда по ней передаются импульсы второго канала. Таких линий в нашем примере можно сделать пять, они будут работать практически одновременно, дав слушателю возможность выбрать переключателем П1 любую из передающихся пяти программ. В реальных кабельных линиях цифровой связи с временным (ударение на «ы») разделением каналов и быстродействующими транзисторными переключателями практически одновременно работают многие тысячи линий связи, по которым передаются тексты, телефонные разговоры и телевизионные программы. Такие системы уже несколько лет как работают, вы пользуетесь ими, часто даже не зная, что с традиционного частотного разделения каналов перешли на временное (ударение на «о»).

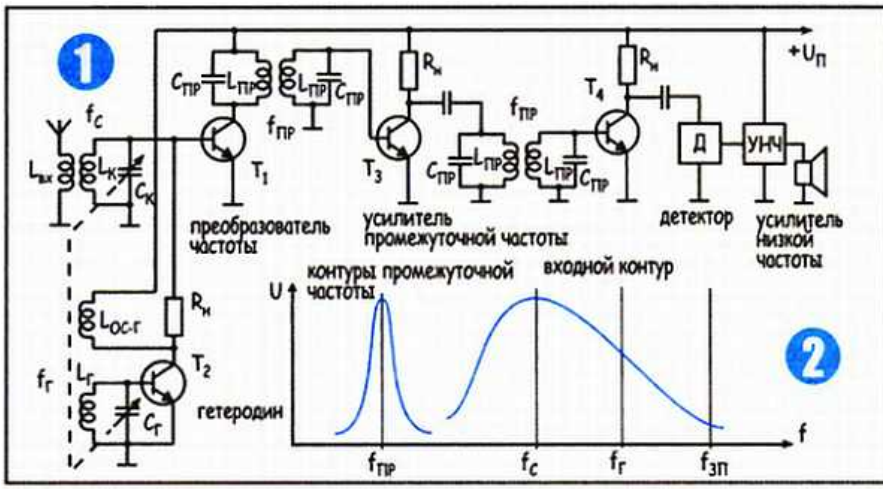
Т-222. **На очереди свет.** А нельзя ли в помощь

сантиметровым волнам использовать радиоволны ещё более короткие и тем самым открыть новые частотные территории для систем связи? Миллиметровые волны ещё в каких-то случаях для этого используют, но и они заметно теряют свою мощность в каплях дождя и в тумане, а более короткие волны для радиосвязи совсем непригодны. Зато всё больше в системах цифровой связи используется свет — электромагнитные волны длиной меньше микрона. Но путешествуют световые сигналы не в открытом пространстве, а по тонкой прозрачной кварцевой нити — по световоду. Источник света — специальные лазеры, обычно их сигнал проходит по световоду сотни километров, из света легко формируются нужные комбинации импульсов цифрового сигнала, а если в линии они заметно затухают, то их несложно восстановить, и дальше сигнал пойдёт как новенький. В месте приёма световой сигнал преобразуется в обычный электрический. В соревновании электрических и световых систем связи (надо бы сказать аккуратнее, свет тоже электромагнитный процесс) решающее слово за надёжностью и простотой техники, а в итоге за стоимостью системы. Сегодня свет уже заметно потеснил своего конкурента, но некоторые специалисты считают, что главные победы у него ещё впереди.

Т-223. **Электроника — мир бессчётных превращений.** Световоды широко используются для передачи не только разных видов цифровой информации, но и телевизионной картинки. При этом она проходит множество преобразований. Сначала с картинки снимают электрическую копию, её превращают в аналоговый сигнал, затем в электрический цифровой сигнал, он копируется в световой и проходит по световоду к месту приёма, где проводятся те же операции, но в обратном порядке. В итоге на большом экране воспроизводят картинку, с которой всё начиналось. Для электроники подобная цепочка превращений — дело обычное, преобразование сигналов, пожалуй, главная её технология.



ВК-254. *Главное на рисунке — примыкающие один к другому шкафы на заднем плане. Это автоматическая линия, которая без прикосновения человеческой руки производит интегральные схемы. Две условные фигуры операторов лишь иллюстрируют последние процессы. Первый — проверка десятков одинаковых схем, одновременно созданных на большой пластине кремния, и отбраковка схем с низкими параметрами. Второй процесс — установка вырезанной схемы в корпус и её соединение с контактными ножками.*



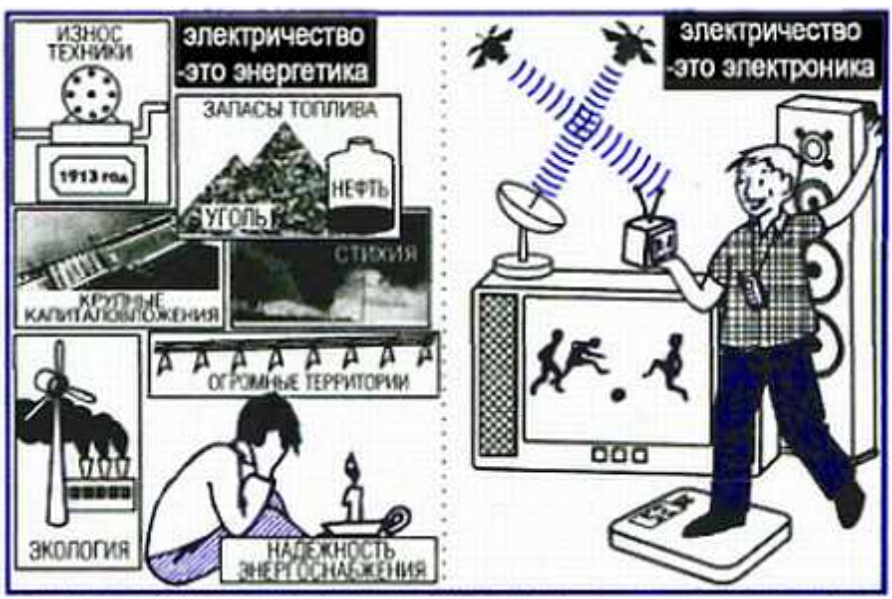
Р-111. СУПЕРГЕТЕРОДИН — ПРИЁМНИК, ЛУЧШЕ КОТОРОГО ПОКА НЕТ. Мы уже знаем, что если через нелинейный элемент пропустить синусоидальный ток, то он перестанет быть синусоидальным. Он будет искажён, появится его спектр — набор синусоидальных составляющих разных частот. А что будет, если через нелинейный элемент одновременно пропустить два тока с разными частотами? Ответ прост — искажен будет каждый из них, и в итоге мы получим два спектра в общем выходном проводе. Но это ещё, оказывается, не всё — в спектре появятся составляющие, рождённые именно совместным появлением двух токов в нелинейном элементе. Если, например, пропустить через него токи с частотами 300 и 400 кГц, то кроме гармоник каждого из них (в нашем примере 600, 900 кГц и далее, а также 800, 1200 кГц и далее) в спектре появятся составляющие с частотами 700 и 100 кГц. Первая из этих частот называется суммарной и численно равна $\mathbf{f}_{сум}$ = 300 + 400 = 700 кГц. Вторая частота разностная, она равна $\mathbf{f}_{р}$ = 400–300 = 100 кГц.

Все рассказанное можно считать коротким предисловием к ещё более короткому рассказу о радиоприёмнике по имени супергетеродин. Он широко используется в радиолах, телевизорах, сотовых телефонах, военных системах радиосвязи, переносных приёмниках. В наиболее простом варианте (1) всё начинается с нелинейного элемента (транзистор $\mathbf{T}_1$), который называется преобразователь частоты. На его вход подаются два переменных тока — сигнал

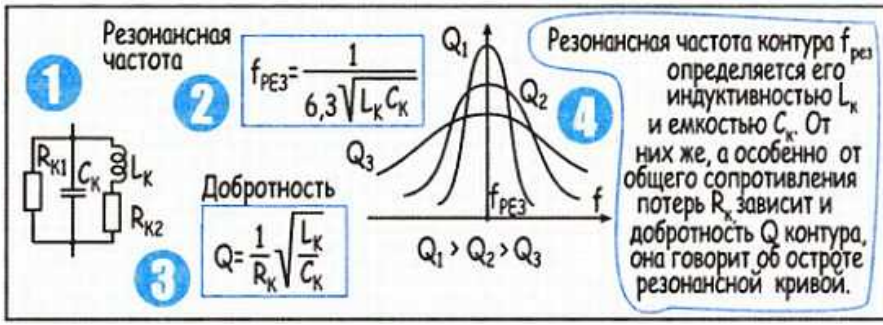
принимаемой станции с частотой $\mathbf{f_c}$ и сигнал вспомогательного генератора по имени гетеродин с частотой $\mathbf{f_г}$. Контур, выполняющий роль коллекторной нагрузки, настроен на разностную, или иначе промежуточную, частоту $\mathbf{f_{пр} = f_г — f_c}$. Далее следуют еще два усилительных каскада ($\mathbf{T_3}$, $\mathbf{T_4}$) и четыре контура $\mathbf{L_{пр}C_{пр}}$, настроенных на $\mathbf{f_{пр}}$. Четыре контура (контуров может быть и больше, так как их не перестраивают) совместно создают острую резонансную кривую (2), то есть сильное подавление соседних станций. Чтобы перестроиться на другую станцию, достаточно изменить частоту гетеродина и создать $\mathbf{f_{пр}}$ с сигналом этой другой станции. Одновременно, правда, нужно перестроить и входной контур $\mathbf{L_кC_к}$, который должен подавить далекую, к счастью, по частоте, как её называют, зеркальную помеху ($\mathbf{f_{зр}}$). Её сигнал мог бы создать с гетеродином ещё один сигнал промежуточной частоты ($\mathbf{f_{пч}}$ (ЗП)), от которого после преобразователя уже не избавишься.

Т-224. **Две непременные операции — принять и применить.** Если строго, по энциклопедии, то электроникой называется область науки и техники, которая занимается электрическими зарядами, их взаимодействием с электромагнитными полями и созданием электронных приборов, таких как лампы, транзисторы, кинескопы. Но принято считать, что электроника занимается сбором информации, отображением её в электрических сигналах, их обработкой и, наконец, использованием полученных результатов. Первую часть этой работы очень часто выполняют датчики, последнюю — исполнительные устройства. Одна такая пара хорошо всем известна — это микрофон, который превращает звук в ток, и громкоговоритель, который превращает ток в звук. Основа датчиков света (фотоэлементов, фотодиодов, фоторезисторов) — вещество, из которого свет выбивает электроны и порождает таким образом электрический сигнал. Фотоэлемент входит в датчик задымлённости, реагируя на изменение оптических свойств воздуха. Фотоэлемент становится, так сказать, датчиком текста, последовательно, линию за линией, считывая информацию с листа бумаги в сканере или факс-аппарате. Пьезокристалл — датчик механической деформации, при сжатии или изгибе на нём появляется э.д.с. Самые простые датчики — разного типа выключатели, они сообщают, какая нажата кнопка или клавиша, закрыта ли дверь лифта и лежит ли на месте телефонная трубка.

Исполнительных устройств тоже огромное многообразие. Это лампочки и светодиоды, с помощью которых электрический сигнал сообщает о том, что где-то что-то включилось или выключилось. Это также жидкокристаллический экран электронных часов или калькулятора, на котором комбинации токов рисуют буквы и цифры. Это, наконец, миллионы светоизлучающих крупинок на экране кинескопа, при попадании в них электронного луча они светятся, создавая яркую цветную картинку. Исполнительным механизмом часто бывает электродвигатель, например, в плече робота или в приводе солнечной батареи на спутнике. Но бывает, что в электронном устройстве исполнителя нет, и обработанную информацию он передаёт дальше, в другие системы.



ВК-255. *Появившиеся более ста лет назад два основных направления в использовании электричества сегодня выросли в две огромные области науки и индустрии: электроэнергетику и радиоэлектронику. Каждая из этих областей имеет свои большие достижения и непростые проблемы. Проблемы энергетики, правда, широкой публике не очень известны, а её достижения миллионам людей часто представляются чуть ли не природными достоинствами мира, в котором мы проживаем.*



Р-112. ДУМАЯ О РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА, НЕ НУЖНО ЗАБЫВАТЬ О ЕГО ДОБРОТНОСТИ. Завершая наши последние встречи с колебательным контуром, обратим внимание на то, о чём стоит подумать, выбирая его детали: катушку индуктивности $\mathbf{L_к}$ и конденсатор $\mathbf{C_к}$. Для начала попробуем записать, как резонансная частота контура зависит от ёмкости конденсатора и индуктивности катушки. Начнём с того, что нам уже давно известно, — резонанс в контуре происходит при равенстве его ёмкостного и индуктивного сопротивлений, то есть при условии $\mathbf{x_L = x_c}$ (Р-66). Подставим сюда уже известные нам значения этих реактивных сопротивлений $\mathbf{x_L}$ и $\mathbf{x}$ на резонансной частоте $\mathbf{f_{рез}}$ и согласно известному правилу (Р-24) попробуем получить $\mathbf{f_{рез}}$ в одиночестве, то есть посмотрим, как эта величина зависит от всех остальных. В итоге мы получим значение $\mathbf{f_{рез}}$, показанное на рисунке. Из него видно, что резонансная частота в одинаковой мере зависит от индуктивности $\mathbf{L_к}$ контура и его ёмкости $\mathbf{C_к}$. Казалось бы, нужную резонансную частоту можно получить при любом соотношении этих величин — намотать, например, катушку в 3–5 витков, а ёмкость взять побольше, несколько микрофарад.

Размышляя об этом, полезно подумать о другой характеристике контура, о его добротности **Q**. Эта величина говорит о том, насколько энергия, запасаемая в конденсаторе или катушке, больше того, что теряется в разного рода сопротивлениях, кроме того, чем больше **Q**, тем острее резонансная кривая (2). И вывод — с целью повышения **Q** желательно, чтобы отношение **L/C** было побольше, то есть индуктивность контура должна быть достаточно большой, чтобы получился контур с высокой добротностью. А высокая добротность — это хорошее

ослабление соседних станций, высокая стабильность частоты генератора и много других очень важных достоинств.

Кстати, у контура реально есть два вида потерь, одни отображаются сопротивлением $\mathbf{R}_{к2}$, включённым в цепь катушки, а другие сопротивлением $\mathbf{R}_{к1}$, подключённым параллельно контуру. Во многих случаях можно сделать упрощённый пересчёт и считать, что сопротивления $\mathbf{R}_{к1}$ нет вообще, а $\mathbf{R}_{к2}$ несколько увеличилось.

Т-225. **Передаётся картинка.** Телевидение — один из самых известных широкой публике представителей электроники. Придумано оно было тогда же примерно, когда и радио, но доступным и распространённым стало лет через пятьдесят — для передачи картинки пришлось решить значительно более сложные задачи, чем для передачи звука.

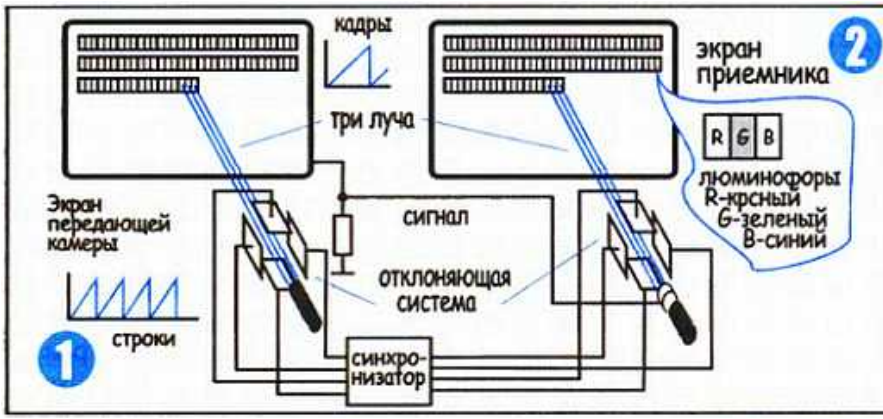
В двух словах напомним, как это делается (Р-113). Объектив видеокамеры проектирует картинку на экран вакуумной передающей трубки, а этот экран изнутри покрыт миллионами микроскопических крупинок-фотоэлементов. Под действием света на них собираются заряды, и чем больше света достаётся какой-нибудь точке экрана, тем больше заряд на ней — световая картинка превращается в невидимую электрическую. Электронный луч быстро строку за строкой обегает экран, собирает заряды и создаёт аналоговый электрический видеосигнал — электрическое описание картинки, отчёт о том, как менялась яркость от точки к точке.

Видеосигнал с помощью радиоволн или по кабелю попадает в ваш телевизор и в итоге управляет электронным лучом, который также строку за строкой быстро обегает экран кинескопа. Это тоже вакуумная трубка (скорее, колба), экран которой изнутри покрыт мельчайшими крупинками уже не светочувствительного, а светоизлучающего вещества — крупинками люминофора. Они светятся, когда в них ударяет электронный луч, и тем ярче, чем сильней удары электронов. Видеосигнал, управляя электронным лучом, заставляет его менять яркость светящихся точек, по мере того как луч с огромной скоростью 25 раз в секунду строку за строкой прочерчивает весь экран. В итоге электронный луч рисует на экране картинку, в точности такую же, какую считывала передающая трубка видеокамеры.

За этим азбучным описанием следует много интересных подробностей, много великолепно решённых сложнейших задач.

Например, такая задача: во всех телевизорах электронный луч в любой момент времени должен находиться в той точке экрана, в какой в этот момент находится считывающий луч передающей трубки. То есть считывающий электронный луч в передающей трубке и рисующий луч в приёмной трубке должны двигаться синхронно и синфазно — только при этом условии на экране кинескопа вы увидите то, что видит видеокамера. А вот решение проблемы — в видеосигнал при передаче вставляют особые синхронизирующие импульсы, которые в телевизоре выделяются из видеосигнала и управляют движением электронного луча в кинескопе.

ВК-256. *Электрическое могущество России — это 600 крупных электростанций, их суммарная мощность составляет 210 гигаватт, то есть 210 миллионов киловатт. Из тепловых электростанций 55 % одновременно снабжают своих потребителей горячей водой, а в зимнее время и отоплением. Тепловые станции, естественно, потребляют углеводородное топливо. На первом месте здесь природный газ, затем следует уголь (вдвое меньше газа), и на последнем месте нефтепродукты — примерно 8 % общего количества.*



Р-113. КАРТИНКА ПЕРЕДАЁТСЯ МАЛЫМИ ПОРЦИЯМИ, НО ОЧЕНЬ БЫСТРО. Сейчас эти телевизоры все чаще называют старыми, но мы все же с них начнем наше знакомство с телевидением. Это идея, принцип, который прожил много десятилетий и проживёт ещё много лет, переходя из привычной модели в новую, в том числе в совсем другую. В системе передачи картинки есть два главных героя. Один из них — фотодиод, сокращённо ФД, под действием света в нём появляются электрические заряды. Второй наш герой — светодиод, сокращённо СД, под действием электричества он светится, чем больше зарядов к нему подведёшь, тем ярче. С помощью этой пары ФД и СД мы можем передать светящуюся точку хоть из Австралии в Канаду. Из попавшего на него света ФД создаст электрический сигнал, он пройдёт тысячи километров по интернетовскому кабелю или по радиолучу через спутник, и в месте приёма СД превратит этот ток в порцию света. Как говорится, полдела сделано, мы научились передавать и воспроизводить одну порцию света — одну светящуюся точку. Теперь, используя эту идею, нужно передать и принять состоящую из таких точек большую цветную картинку, что-то вроде фотографии. Для этого сначала создадим два экрана — передающий из ФД (фотодиодов) и приёмный из СД (светодиодов). В каждом экране примерно полмиллиона микроскопических (меньше миллиметра) диодов — 625 строк по 832 диода в каждой. Можно бы, конечно, объективом направить картинку на передающий экран и каждый его ФД соединить проводом с таким же по расположению СД приёмного экрана, но полмиллиона

соединительных проводов или иных каналов связи — это многовато. Передающий картинку экран с ФД и воспроизводящий экран с СД поместили в стеклянные вакуумные баллоны (их почему-то называют трубками) и самое ответственное дело — переключение диодов (в передающей трубке ФД, в приёмной СД) поручим электронному лучу. Луч находится внутри баллона, система магнитных или электрических полей очень быстро перемещает его, и луч за 4 сотые доли секунды оббегает все диоды и повторяет эту операцию 25 раз в секунду. Повсеместно употребляемое ныне слово «цветной» заставляет признаться, что приведённое выше количество диодов нужно умножить на три. Потому что каждый ФД и СД (в приёмных трубках вместо них используют точки светящегося вещества — люминофора) это фактически система красного, синего и зелёного цвета, которые, сложившись, создают нормальное многоцветное изображение.

Ещё одна нелегко решавшаяся проблема — передача многоцветной картинки. Как учит опыт цветной фотографии, можно воспроизвести всё богатство красок, если, так сказать, утроить ТВ-систему — с помощью трёх светофильтров выделить три части цветной картинки: красную зелёную и синюю. Затем с помощью трёх сигналов нужно передать эти три картинки в телевизор и там с помощью трёх разных люминофоров (красного, зелёного и синего) воспроизвести их и точно сложить на общем экране. Были придуманы разные системы цветного телевидения, некоторые даже добрались до массового производства.

Например, были созданы телецентры и выпускались телевизоры, работавшие по системе, где поочерёдно передавались три картинки основных цветов: красного, синего и зелёного. Они попадали на три кинескопа, создававших три разноцветные картинки (красную, синюю и зелёную), которые в итоге складывались на одном экране с помощью системы зеркал, формируя многоцветное изображение. Помимо прочих недостатков такое цветное телевидение занимало в эфире место трёх чёрно-белых телецентров.

Нынешние системы цветного телевидения — совместимые. Это значит, что на цветном телевизоре можно смотреть чёрно-белые передачи, а на чёрно-белом — цветные (в чёрно-белом виде). С телепередатчика уходит в эфир чёрно-белая картинка, в спектр которой вставлены два особых служебных (невидимых

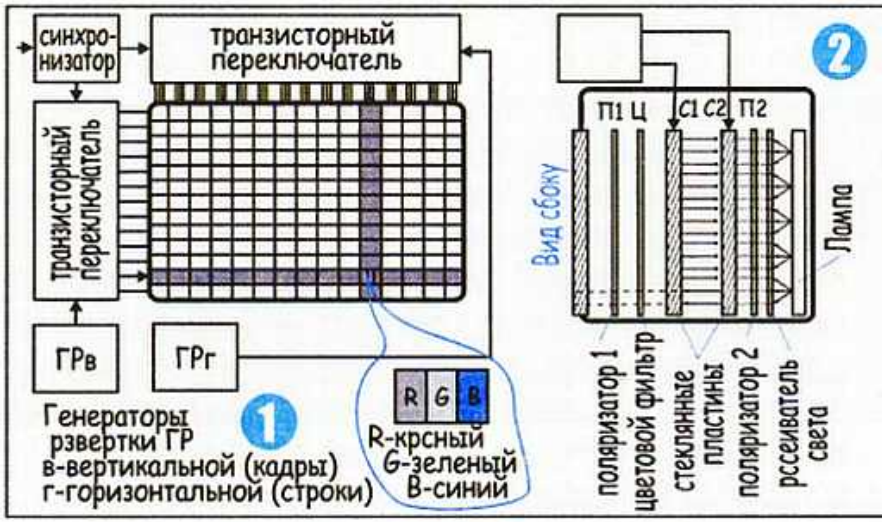
зрителю) сигнала цветности. С их помощью в телевизоре воссоздаются три исходные картинки: красная, синяя и зелёная. При этом сигнал цветного ТВ в эфире занимает такую же полосу частот, как и сигнал чёрно-белого, — около 6 мегагерц. Жалко лишь, что в своё время не удалось договориться об едином для всего мира стандарте сигналов цветности, и сегодня из-за этого существуют три системы цветного телевидения: система NTSC (произносится: энтэ-эсси) в США, Канаде, Великобритании, Японии, Индии и других странах; система PAL в Германии, Италии, Бельгии и система SEKAM во Франции, России и некоторых странах Восточной Европы.

Складывание трёх одноцветных картинок уже давно производится в самом кинескопе. Его экран изнутри покрыт тройками люминофорных точек с разным цветом свечения: красным, синим, зелёным. В кинескопе три электронных луча, каждый из них управляется своим видеосигналом (красным, синим или зелёным) и попадает только на свой люминофор (красный, синий, зелёный) благодаря использованию маски с мельчайшими дырочками или особой направляющей решётки.

НАУКА, ТЕХНИКА, ТЕХНОЛОГИЯ : ЗАДАЧИ НА ЗАВТРА
– Термоядерный реактор.
– Реактор на быстрых нейтронах.
– Космические электростанции, передача энергии на землю мощным радиолучом.
– Комплексы мощных ветроэлектростанций.
– Солнечные электростанции с концентратором излучения.
– Парогазовый цикл.
– Мощные газовые турбины.
– Сжигание угля в кипящем слое.
– Использование низкотемпературного тепла.
– Использование тепла Земли.
– Приливные электростанции.
– Сверхкритические параметры пара.
– Комплексное использование угля.
– Резервные линии передачи и местные аварийные генераторы.
"И НА ПОСЛЕЗАВТРА"
– Накопители электроэнергии на малогабаритных конденсаторах очень большой емкости.
– Малые электростанции, использующие энергию малых рек, ветра, солнечного излучения, морских волн и др.
– Сверхмалогабаритные источники питания для микроэлектроники.
– Химические источники тока с использованием слабых радиоактивных излучений.
– Использование сверхмалых количеств «бесплатной» энергии (хаотические движения, звуковые и тепловые «шумы», фоновое электромагнитное излучение и др.) для питания микромощных электронных приборов.
– Электропитание систем типа «Smart Dust» («Смарт даст» – «Умная пыль»), распределенные в пространстве системы микродатчиков.

ВК-257. *Трудно представить себе, что лет триста назад во всём мире электричеством интересовались и пробовали что-то о нём узнать человек десять, ну, может быть, двадцать. Сегодня таких людей тысячи, а может быть, и миллионы. Кто-то из них работает в больших компаниях и в дорогих проектах (реактор ИТЭР обойдётся в 25 миллиардов долларов). Кто-то в заводском*

КБ пытается снизить стоимость серийного топливного элемента. А кто-то думает о не очень ещё понятном, увидев в нём начало нового дела.



Р-114. ПЛОСКИЙ ЭКРАН: ВСЁ ТО ЖЕ САМОЕ, НО СОВЕРШЕННО ИНАЧЕ. Главная заметная пользователю особенность современных телевизоров — большой плоский экран. Для телевизионного кинескопа нужно было довольно большое пространство, в телевизоре с размером экрана 50–60 сантиметров и ящик имел примерно такую же глубину. Современные экраны вешают на стену, как картину, и тонким проводом соединяют с небольшим ящичком самого телевизора. Профессионалы радиоинженеры хорошо понимают, что именно позволило отказаться от оббегающего экран электронного луча. Для этого нужно было ввести в схему телевизора быстродействующий переключатель (1), то есть в прежние времена ввести новый блок, имеющий сотни электронных ламп. Малогабаритный транзисторный переключатель для плоского экрана можно было создать лет тридцать назад, но некоторая задержка с появлением плоских экранов вполне объяснима — были разработаны совершенно новые оптические системы. В плоских экранах встречаются, например, системы с использованием жидких кристаллов (система LCD), вместе с которыми работают поляризаторы светового луча и оптические фильтры.

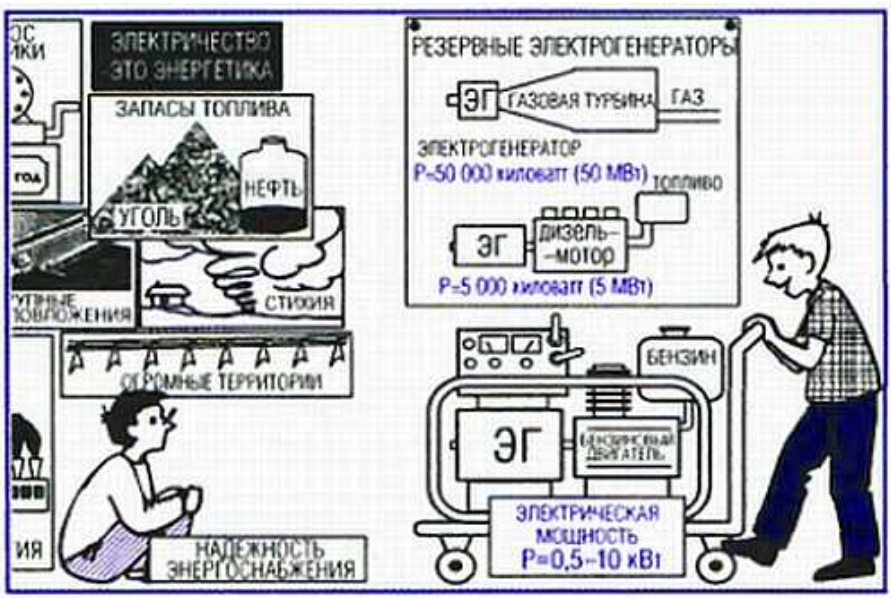
Используется зависимость прозрачности жидких кристаллов от приложенного к ним напряжения, а сами они находятся между двумя тонкими листами стекла, образующими стеклянную пластину. Большой популярностью пользуются экраны с плазменными источниками света. В некоторых случаях (система SED) плоский экран состоит из двух пластин стекла, расположенных на небольшом расстоянии, и напоминает кинескоп. Одна из стеклянных пластин — источник электронов, на второй этими электронами создаются светящиеся пиксели (от английского «пикчер сел» — «клетка изображения»). Практически все системы плоского ТВ-экрана энергично развиваются, а активность их рекламных служб ставит перед телезрителями непростую задачу выбора. В то же время вряд ли стоит считать разумным бесконечное ожидание чего-то нового. Миллионы телезрителей уже много лет смотрят передачи на большом экране и, скорее всего, ещё много лет будут их смотреть, хотя уже пришли новые и в чём-то более совершенные модели.

Всё это напоминание не должно создавать иллюзию этакой лёгкости и простоты. Цветной телевизор — сложнейшая система с большим числом сложных электрических цепей, выполняющих множество виртуозных операций с электрическими сигналами. Этот представитель современной фантастической электроники стал массовым, доступным и надёжным аппаратом благодаря многолетнему настойчивому поиску наилучших технических решений и успехам технологии, сумевшей, в частности, свести в несколько микросхем бессчётное множество элементов электрических цепей цветного телевизора.

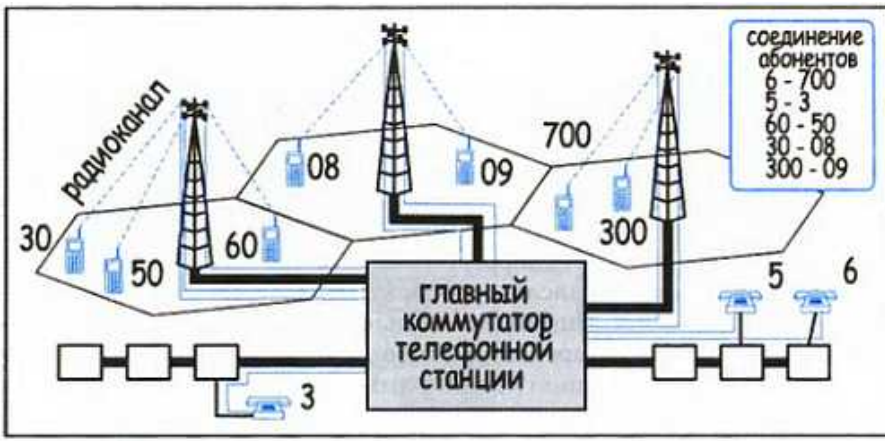
А инженеры вместе с тем продвигаются дальше, превращая невозможное не просто в реальность, а в реальность общедоступную. Используя высокочастотный световодный кабель, радиорелейные линии, спутники-ретрансляторы, они создали гигантскую мировую телевизионную сеть, и любой маленький городок, куда ещё не так давно телевидение вообще не доходило, сейчас принимает десятки ТВ-программ. Несложной и недорогой стала аппаратура для приёма ТВ прямо со спутников-ретрансляторов, покупай и смотри. А ещё недавно сигналы со спутников принимали лишь специальные приёмные центры с многометровыми тарелками антенн, и через местные телецентры они ретранслировали принятые программы для рядового зрителя.

Ещё одна новинка — в телевизорах появился плоский экран (Р-114). В нём нет электронного луча, который в кинескопе 25 раз в секунду обегает все полмиллиона люминофорных точек, в нужный момент зажигая каждую из них с нужной яркостью (в цветном телевизоре, напомним, три луча, а всех люминофорных точек 1,5 миллиона). В плоском экране каждая люминофорная точка фактически включается отдельно в нужный момент быстродействующими переключателями. Итоговый объём их работы — около 40 миллионов безошибочных и строго синхронизированных включений в секунду. Только в последнее время у технологии светящихся экранов и цифровой техники появилась возможность заплатить столь высокую цену за эту приятную деталь интерьера — плоский ТВ-экран огромных размеров.

Другая представленная телезрителям новинка — уже не 1,5 миллиона, а почти 6 миллионов точек, формирующих цветную картинку, то есть значительно более высокая её чёткость. Новая система так и называется: телевидение высокой чёткости, ТВВЧ, или, по-английски, HD, «хай дифинишн» — «высокая чёткость». Эта система открывает путь к большому широкому экрану при очень высоком качестве изображения, как в хорошем кино. Уже ведутся передачи в этом стандарте, и серьёзно говорят о его повсеместном введении, что, конечно, потребует совершенно новой передающей и приёмной техники. Но это, судя по всему, уже никого не остановит.



ВК-258. *Кратковременное отключение потребителей от городской электросети случается редко, но случается. У него могут быть трагические последствия, например в госпиталях, где в это время идут операции и перестаёт работать аппаратура, поддерживающая жизнь пациента. В некоторых особо важных объектах на случай такого аварийного отключения сети мгновенно и автоматически включаются обычно небольшие электрогенераторы с собственными бензиновыми двигателями или дизелями.*



Р-115. КАРМАННАЯ ПРИЁМО-ПЕРЕДАЮЩАЯ РАДИОСТАНЦИЯ ПО ИМЕНИ «СОТОВЫЙ ТЕЛЕФОН». У широкой публики сотовые телефоны появились сравнительно недавно. Достаточно вспомнить, что в 1983 году вышел первый серийный аппарат фирмы «Моторола» длиной 33 сантиметра и стоимостью около 4 тысяч долларов. При этом большая очередь покупателей месяцами дожидалась возможности купить его. Через 20 лет годовой выпуск сотовых аппаратов превысил полмиллиарда, а начиная с 2010 года их выпускают более 1,5 миллиарда в год. Успехи схемотехники и электроники интегральных микросхем позволили в миниатюрном корпусе создать шедевр, умеющий делать десятки разных полезных дел, включая фотографирование с записью картинки в компактную электрическую память. Но, конечно, главное дело телефона — это связь. Внутри аппарата имеется очень небольшой радиопередатчик, который по вашему указанию (нажатие определённых кнопок) вызывает нужного вам абонента и для этого излучает сигнал в

диапазоне очень коротких волн — длиной 15 или 30 сантиметров. Сигнал этот попадает в приёмник, установленный на высокой стальной мачте (Р-108) и далее, например, по кабелю, приходит в главный коммутатор местной телефонной станции. Там автоматы произведут необходимые соединения, и ваш вызов по проводам придёт на городской телефон или на другую высокую мачту, где другой передатчик пошлёт радиосигнал вызова вашему абоненту. Он примет этот радиосигнал чувствительным приёмником, который имеется в каждом сотовом аппарате. По такой мгновенно созданной линии связи вы можете разговаривать, пользуясь микрофонами и громкоговорителями своих сотовых аппаратов и непременно используя конечные участки радиосвязи, дающие вам свободу перемещений.

Недавно на свой страх и риск автор провёл несколько десятков неформальных бесед с владельцами сотового телефона. Оказалось, что больше половины из них вообще не знают, что разговаривают по радиоканалу, — придумали телефонисты какой-то телефон без проводов, а какой именно, это не наше дело. Остальные знают, что в сотовой связи как-то используется радио, но как это делается, почти никто не мог пояснить даже в общих чертах. Эти беседы возвращают к давно не дающей покоя теме — к школьному образованию. Зачем конкретно мы ходим в школу? Для чего дети проводят в ней 11 или 12 лет? Что, обучаясь в школе, обязательно нужно узнать, а что не обязательно? Хватает ли сил на все сложности, о которых там говорится? Почему так мало времени достаётся проблемам жизни общества, проблемам человечества? И почему большинство выпускников выносят из школы меньше, намного меньше и даже ничтожную часть того, о чём рассказывали учителя? Эти вопросы прежде всего появились для себя, для своих ближайших планов. А также для тех, кто торжественно произносит слова «Школьная реформа», не понимая их истинного значения.

Т-226. **Новая жизнь железной проволоки.** Ещё в далёкой древности человек научился помогать своей памяти, придумал, как мы теперь говорим, внешние запоминающие устройства — наскальные рисунки, иероглифическое, а затем слоговое письмо,

а в дальнейшем книги, чертежи, географические карты, фотографии, граммофонные пластинки, кино. Новую эпоху открыли устройства электронной памяти, они могут хранить практически любую информацию, записывают её очень компактно, а многие к тому же позволяют быстро и без особых усилий находить нужную запись.

В персональном компьютере на небольшом внутреннем магнитном диске (винчестер, или, иначе, хард драйв, жёсткий диск) в цифровом виде сейчас уже хранится около 100 гигабайт, а это 40 тысяч толстых книг, для них понадобится полка длиной больше километра. И всё это на тонком диске диаметром порядка 10 сантиметров. И далее, указав название, можно в считанные секунды извлечь из этого массива любой нужный его раздел. Записывая и считывая информацию, магнитная головка движется относительно вращающегося диска с такой высокой скоростью, что их соприкосновение недопустимо — головка мгновенно нагреется и испортит диск. Поэтому у головки есть своего рода крылышки, и она, подобно самолёту, при вращении диска летит над ним на микронной высоте.

Магнитная запись была придумана давно и первоначально велась на тонкую стальную проволоку. Она двигалась мимо щели в кольцевом сердечнике магнитной головки, на котором, как у электромагнита, размещалась катушка (Р-47). К катушке подводили записываемый сигнал, по ней шёл меняющийся ток, и меняющееся магнитное поле, замыкаясь в районе щели через проволоку, создавало в ней остаточную намагниченность (Р-48) — записанную на проволоке (в виде меняющейся её намагниченности) магнитную копию электрического сигнала. При воспроизведении проволока, двигаясь мимо щели, своим меняющимся магнитным полем меняла общее магнитное поле, охватывающее витки катушки, и тем самым наводила в катушке э.д.с. — электрическую копию магнитной записи.

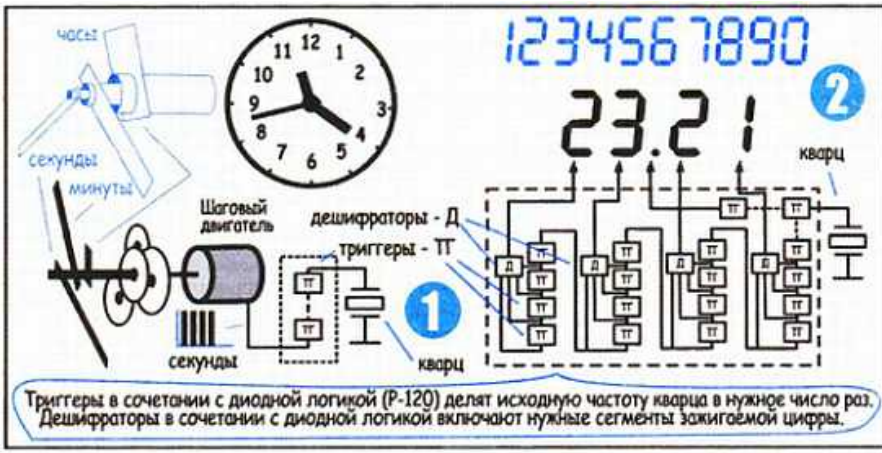
Сегодня в магнитофонах, видеомагнитофонах, в устройствах магнитной памяти компьютера происходит в принципе то же самое. Но, конечно, проволоку сменил нанесённый на прочную плёнку или на диск тонкий слой лака с мельчайшим ферромагнитным порошком. Кроме того, с прочитанным сигналом серьёзно работает электроника.

Наглядный пример — пластиковые карточки с ферромагнитной полоской. Они применяются чрезвычайно широко для самых разных целей — от квартирного ключа или служебного пропуска до финансового документа. Быстро продвинув карточку мимо считывающей головки в приёмном блоке, мы обычно не задумываемся о том, что вслед за этим

делает электроника. В банковском автомате, например, она моментально обращается в центральный компьютер, проверяет достоверность карточки, наличие денег на вашем счёте, правильность введённого вами личного кода, выясняет заказанную сумму наличных, уточняет возможность её выдачи, выполняет ряд защитных операций, исключающих ошибку или мошенничество, и только после этого включает исполнительные механизмы. Они послушно отсчитывают и выталкивают вам нужные купюры, а также печатают чек с отчётом о проведённой операции и указанием оставшейся суммы. Этот маленький пример всего лишь напоминает о гигантской невидимой миру работе, которую сегодня выполняет электричество в безотказных электронных автоматах.

Или человек уничтожит дымы и мусор, или дымы и мусор уничтожат человека!
Все назад!
Человек! Будь человеком!!!
Ну, погоди!
Воды! Пол-царства за стакан воды!
Берегись парников

ВК-259. *Жизнь существует на Земле миллиарды лет, мир живого ко многому привык, приспособился и тяжело переносит изменение природных условий. Об этом размышляли давно, но серьёзные исследования начались лет 200 назад и привели к глубокому пониманию изменений окружающей среды, в частности, почв, вод, атмосферы. Наряду с призывами энтузиастов появились государственные законы и системы контроля, цель которых не допустить изменений, которые могут травмировать земную жизнь.*



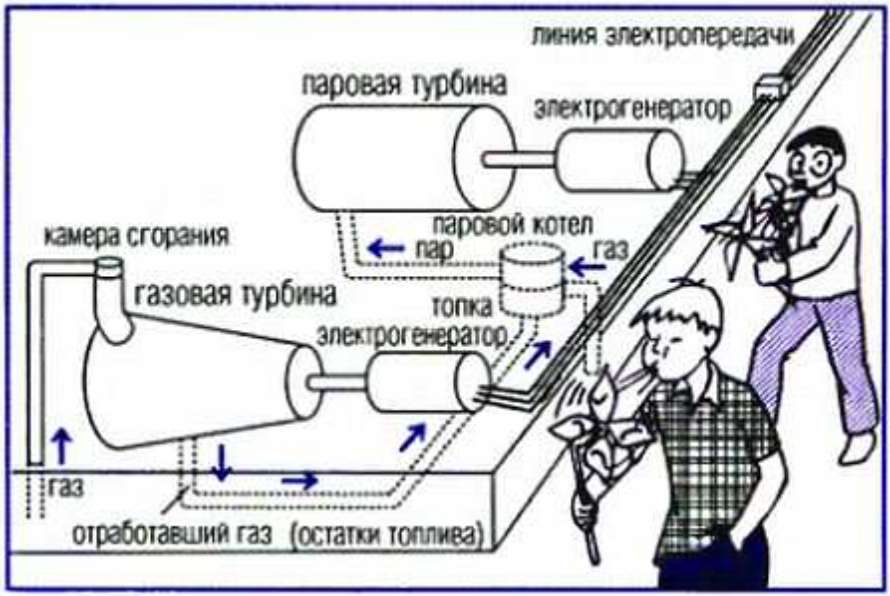
Р-116. ЧАСЫ ОЧЕНЬ ТОЧНЫЕ И НЕСЛЫХАННО ДЕШЁВЫЕ. Наручные часы, как их называют в торговле, стали чуть ли не первым изделием широкого спроса, в котором применили только что появившиеся интегральные микросхемы. Микросхемы для часов были не очень сложными — несколько сотен транзисторов и диодов в основном в простых схемах триггеров и дешифраторов (на рисунках символически показаны лишь несколько цепочек триггеров). Главной действующей деталью в этих электронных часах (2), как позже в большинстве других, стал небольшой кристаллик кварца, в котором поддерживали его собственные колебания с очень стабильной частотой (1). Эта стабильность частоты обеспечивала первым электронным часам высокую точность отсчёта времени, недостижимую для всё еще выпускавшихся недорогих механических часов, где время отсчитывалось по колебаниям металлических «маятников». Для электронных часов важнейшим достоинством кварца является то, что это пьезокристалл. То есть при механических колебаниях кристалла на его гранях появляется столь же стабильное переменное электрическое напряжение той же частоты. Это напряжение подают на цепочки триггеров (Р-118), которые делят частоту и выдают сигналы, отображающие интервалы времени в одну секунду, минуту, час, сутки, а в большинстве моделей также месяц и год. По этой информации через дешифраторы подаются сигналы на жидкокристаллический экран — на нём из семи коротких линий для каждой цифры отображается

текущее время (2).

В другой модели часов (1) кварцевый генератор с триггерной цепочкой деления частоты выдаёт электрические сигналы лишь с секундной продолжительностью. Эти сигналы поступают на миниатюрный шаговый электродвигатель, который, вращаясь рывками, двигает секундную стрелку. Всё остальное замедление и создание необходимой скорости движения минутной и часовой стрелок получают с помощью обычного комплекта шестерёнок. Следует заметить, что вращение передаётся всем стрелкам с помощью единого трёхосного механизма. В нём тонкая ось вращает секундную стрелку, более широкий цилиндр вращает минутную стрелку и внешний цилиндр — часовую.

Т-227. **Инструменты для первооткрывателей.** Восхищаясь достижениями науки, иногда полезно вспомнить о технике, помогавшей первооткрывателям. Невозможно представить себе, как без электронных средств контроля и управления могли бы работать ядерные реакторы. И как без радиоэлектроники, без радионавигации, связи, телеуправления, громоздких вычислений в реальном масштабе времени свершились бы космические полёты, особенно такие, как высадка человека на Луну или посадка автоматов на Венеру и Марс. Не говоря уже о том, что с этих планет мы получали от космических автоматов прекрасные телевизионные репортажи.

Сегодня электронной техникой вооружены практически все области науки — от биологии до археологии. Электроника умножает силы исследователей, а нередко позволяет узнать то, что без неё узнать не удалось бы.



ВК-260. *Еще в начале прошлого века паровые турбины стали основным двигателем для вращения ротора электрогенераторов на тепловых электростанциях. Несколько десятилетий назад им на помощь стали приходить газовые турбины, основное достоинство которых — быстрый запуск при увеличении потребляемой электрической мощности. Сейчас остатки газа, отработавшего в своей турбине, направляют в топку парового котла и в итоге получают более высокий к.п.д., чем у каждой турбины в отдельности*

Р-117. МУЛЬТИВИБРАТОР — ГЕНЕРАТОР ИЗ ЧИСЛА САМЫХ ПРОСТЫХ. В былые времена, решив заняться радиолюбительским конструированием, будущий инженер начинал с простого или очень простого радиоприёмника. В ламповую эпоху приходилось немало

поработать, чтобы, собирая приёмник, получить какой-то результат, но зато вознаграждение было огромным. В комнате звучала музыка, что-то быстро рассказывали непонятные заграничные голоса, о великих делах сообщали свои последние известия. Даже появившиеся вначале шумы и потрескивания далёких грозовых разрядов вызывали радость — дело сделано, приёмник работает, и нужно лишь сместить настройку контура, чтобы попасть в радиовещательный диапазон. Думается, что приёмник всегда будет наилучшим способом приобщения к практическому радио, но в наше время есть и более простые схемы, помогающие приобщиться к великому делу. В их числе мультивибратор (1) — генератор, который можно довольно легко и быстро собрать, и он, скорее всего, сразу же запоёт тонким голосом, сообщая, что готов на что-то пригодиться. Мульт, как его коротко называют, это первый шаг к простейшему музыкальному инструменту. Как видите, в схеме простейшего мультивибратора всего 2 транзистора, коллектор каждого (выходная цепь) связан с базой (входная цепь) соседа. Благодаря такой связи транзисторы поочерёдно открывают и закрывают друг друга, при этом в коллекторной цепи каждого идёт меняющийся ток. В зависимости от деталей схемы, изменения тока могут находиться в частотном диапазоне от самых низких звуковых частот до очень высоких, а потому и неслышимых частот радиодиапазона. На рисунке (текст в самой верхней голубой рамке) указаны сопротивления резисторов и ёмкость конденсаторов, при которых частота будет в районе 200 герц, изменить её можно, подбирая детали схемы. Вместо указанных в списке транзисторов можно применить любые другие примерно такой же мощности.

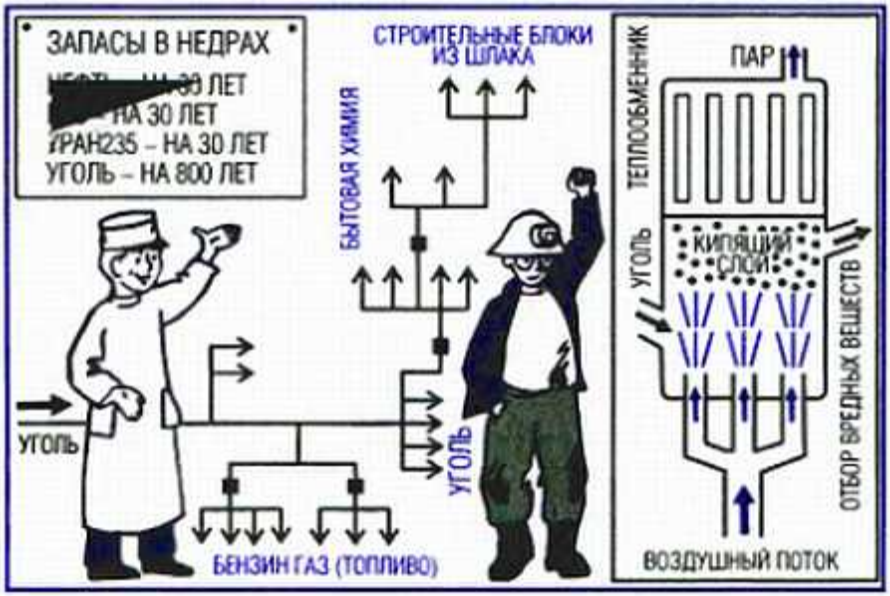
Один из примеров — ускорители ядерных частиц, гигантские электронные или протонные приборы. Крупный гамбургский ускоритель ДЕЗИ (недавно он был мировым чемпионом, но сегодня это уже рядовой инструмент, один из нескольких) расположен в подземных аппаратных залах и кольцевом туннеле. Кольцо очень большое, его диаметр 2 километра, то есть длина кольца более 6 километров. В нём проходят две кольцевые вакуумные камеры — две металлические трубы диаметром несколько сантиметров, в одной ускоряется пучок электронов, в

другой в противоположную сторону разгоняют пучок протонов. Сверхпроводниковые электромагниты, расположенные вдоль кольца, сжимают пучки частиц до десятых долей миллиметра, удерживают их в центре камеры и заодно слегка отклоняют от прямой, формируют кольцевую траекторию. Разгоняет частицы внешнее электромагнитное поле, и частоту его постепенно увеличивают — в протонной камере до 500 мегагерц и в электронной до 50. В итоге за 20-минутный цикл ускорения частицы набирают околосветовую скорость и очень большой запас энергии. В нужный момент и в нужном месте встречные пучки частиц отклоняют магнитным полем, направив их друг на друга. Частицы сталкиваются, создавая главный продукт всей операции — огромное количество осколков — частиц, родившихся уже после столкновения, на лету.

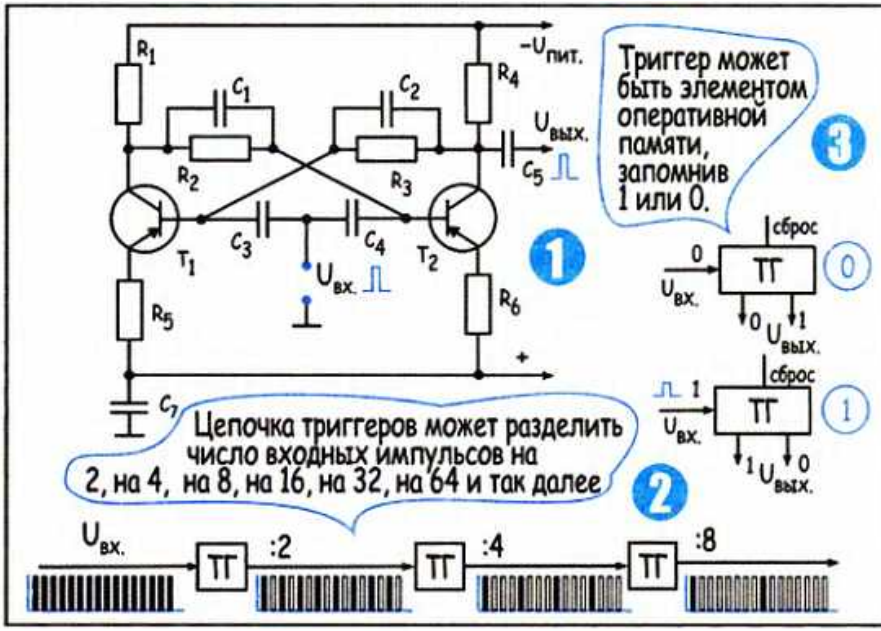
Теперь вступает в дело другой важнейший агрегат ускорительного комплекса — детектор, он должен обнаружить родившиеся новые частицы, получить первые сведения о них. Связав в своё время слово «детектор» с миниатюрным полупроводниковым диодом, трудно представить себе, что детектор ускорителя ДЕЗИ — сооружение с трёхэтажный дом. Это тоже своего рода электронный прибор, его размеры 12 х Ю х 15 метров, и весит он 28 тысяч тонн, больше, чем 30 больших самолётов. Частицы, родившиеся при столкновении пучков, поочерёдно попадают в две большие цилиндрические камеры детектора, одна заполнена газом, другая жидкостью. Вдоль камер натянуты десятки тысяч тонких проволочек, на каждую пару подано напряжение. Главная задача детектора — ничего не упустить, главный метод — регистрация импульсов тока, они возникают, когда частица проскакивает между проволочками, ионизируя газ или жидкость. Сильное поле большого сверхпроводникового электромагнита (в его охлаждающей системе 15 тонн жидкого гелия) отклоняет частицы, их траекторию можно вычислить, зная, между какими проволочками пролетела частица. Собрав и обработав всю эту огромную информацию, пытаются представить себе подробности столкновения частиц и последующих событий, получить новые сведения о глубинном строении материи. Так, на ускорителе ДЕЗИ было подтверждено предположение теоретиков о единой природе электромагнитного и слабого взаимодействий (Т-20).

Последнее столетие принесло человечеству великие научные открытия: атомная энергия, выход в космос, целый мир новых материалов, расшифровка генетического кода, антибиотики. Во всем этом, конечно, прежде всего талант и настойчивость армии исследователей. Но ещё и совершенство их вооружения —

исследовательских установок и инструментов, в значительной мере электронных.



ВК-261. *Даже если создание водородного реактора завершится успешно, уйдёт, видимо, ещё полвека, чтобы сменить всю мировую энергетическую систему. Так что с нынешним топливом предстоит ещё долго иметь дело, и стоит подумать о том, чтобы сделать эти взаимодействия более полезными. Например, ещё не всё сделано для получения из угля жидкого топлива и газа. Для сжигания угля в кипящем слое — в потоках воздуха. И для получения из угля ценных химических продуктов и строительных блоков.*



Р-118. ТРИГГЕР — ОСОБО ПОПУЛЯРНЫЙ РАБОТНИК АВТОМАТИКИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ. По внешнему виду схемы триггера и мультивибратора (Р-117) очень похожи — те же два транзистора, та же связь выходной (коллекторной) цепи с входной (базовой) цепью соседнего транзистора (1). Однако сразу видно, что схемы эти, особенно межтранзисторная связь в них, заметно отличаются, и поэтому триггер работает совсем иначе, чем мультивибратор. Он не изменяет самостоятельно и непрерывно свой режим, создавая в коллекторной цепи непрерывно меняющийся ток. Триггер может годы находиться в одном из устойчивых состояний, например, в котором транзистор $\mathbf{T}_1$ открыт и пропускает ток, а транзистор $\mathbf{T}_2$, закрыт и тока не пропускает. Триггер сменит это своё состояние на второе возможное, когда $\mathbf{T}_2$ открыт и $\mathbf{T}_1$ закрыт, только под действием пришедшего к нему внешнего сигнала, под действием входного импульса $\mathbf{U}_{вх}$. Поэтому одна из востребованных профессий триггера — он делит число входных импульсов $\mathbf{U}_{вх}$ на 2. А несколько последовательно соединённых триггеров могут разделить частоту входного сигнала на 2, 4, 8, 16, 32 и так далее (2).

Другая исключительно распространённая профессия

триггера — он служит элементом памяти (3). При этом одно положение триггера означает 1 двоичного кода, а второе означает 0. Если на 8 поставленных на 0 триггеров (так всегда бывает после команды «сброс») по 8 проводам направить восьмизначное двоичное число, то провод, несущий 1, переведёт триггер в другое состояние, а провод, несущий 0, оставит всё без изменений — блок триггеров запомнит полученное восьмизначное число. Отработана процедура считывания записанной информации, в том числе с восстановлением, если нужно, существовавшей записи. Миллионы триггеров можно обнаружить в компьютере, они миллионами экземпляров используются в электронных автоматах.

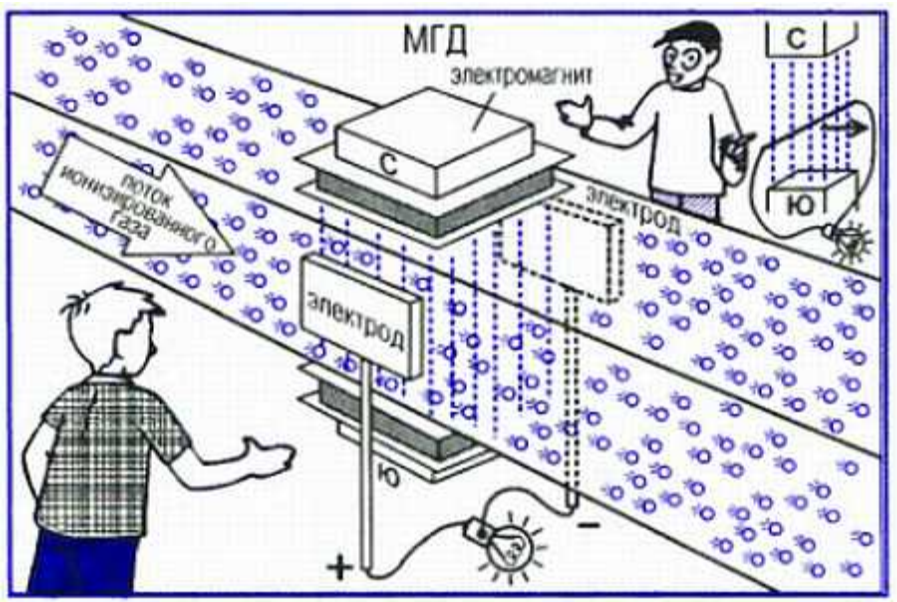
Т-228. **Особая профессия — помощник врача.** Размышляя о практическом значении электроники, нельзя не вспомнить медицину, это тема особая: как известно, мера всего человек. Подумайте, как много бед предупредил несложный регистратор аналогового электрического сигнала, который появляется при сокращении сердечной мышцы и записанный график которого именуется кардиограммой. И как много непоправимых трагедий остановила аппаратура, помогающая проводить радикальные операции на сердце и сосудах.

Немногим более ста лет назад, в один год с изобретением радио, был создан электровакуумный прибор — рентгеновская трубка. В ней ускоренные высоким напряжением электроны при резком торможении испускают рентгеновские лучи, по своей природе, как выяснилось, очень короткие электромагнитные волны, они в сотни, тысячи и миллионы раз короче световых волн. Рентгеновские лучи, проникая через ткани, совершили настоящую революцию в медицине — позволили заглянуть внутрь организма.

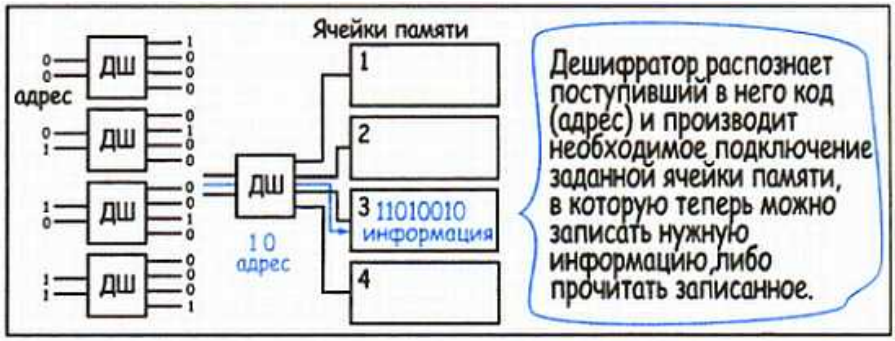
Много десятилетий рентген был вне конкуренции, и лишь сравнительно недавно благодаря достижениям электроники стали появляться и другие методы такого внутреннего видения. В их числе приборы для ультразвуковых исследований (УЗИ), например ультразвуковые локаторы. Ещё одна система внутреннего видения — эндоскоп, вариант кабельного телевидения, где через небольшой разрез или иным способом в организм вводят тонкий кабель с видеокамерой на конце. Иногда эндоскоп объединяют с хирургическим инструментом и под прямым визуальным контролем выполняют хирургические

операции, в последнее время довольно сложные.

Прямой, так сказать, наследник рентгена — рентгеновский томограф, с помощью вычислительной техники он намного обошёл прародителей. В компьютер в цифровом виде вводится несколько рентгеновских снимков, сделанных с разных сторон, машина вычисляет и демонстрирует на дисплее детальный «разрез» наблюдаемой области. Компьютерный томограф — это не прибор, это метод и, если хотите, стратегия. Уже сейчас, заменив в томографе рентген ядерным магнитным резонансом (ЯМР — тонкий квантовый процесс, позволяющий оценить состав вещества), получают «разрез» с указанием неуловимых ранее отклонений в структуре тканей.



ВК-262. *Эту красивую идею высказал еще Фарадей: для получения электромагнитной индукции можно двигать не проволоку, а ионизированный газ. Когда он проходит магнитное поле, в нём, как в проводнике, наводится э.д.с., и мы получим электрическую энергию. Такой МГД (магнитогидродинамический) генератор долго изучался, а в 1971 году на одной из московских электростанций был построен с мощностью 25 МВт. Исследования на нём приближают использование идеи в технике будущего.*



Р-119. АБСОЛЮТНО НЕОБХОДИМЫЙ И НЕ ОЧЕНЬ ИЗВЕСТНЫЙ ДЕШИФРАТОР. Это устройство, также работающее с двоичными числами и иными двоичными кодами, совсем уже мало знакомо широкой публике. Нужно ли вообще такое знакомство? Это важный вопрос, о котором удалось лишь мельком сказать в конце подписи к рисунку Р-115 о сотовом телефоне, и ответ на который пока не отражён в законах. В ожидании решений глобальной важности скажем пока несколько слов о самом дешифраторе (декодере). Даже только знание этого слова и простейших операций, доверенных дешифратору, реально облегчит знакомство с устройством нашего мира. Сегодня дешифраторы — это большая наука и серьёзные теории, посвящённые операциям с различными кодами. В то же время в электронных автоматах и компьютерах дешифраторы выполняют много таких операций, которые можно пояснить простыми примерами. Представьте себе, что на космическом корабле в результате вычислений на входе дешифратора (1) в виде электрических импульсов и пауз входного напряжения $\mathbf{U}_{вх}$, появился один из четырёх управляющих сигналов — 11, 10, 01 или 00. Каждый из этих сигналов должен привести к какому-либо важному действию, например, к включению небольшого реактивного двигателя, к повороту влево или вправо приёмной антенны и к повороту солнечной батареи. Дешифратор по входному напряжению $\mathbf{U}_{вх}$ определяет, какой из четырёх сигналов пришёл, его схема легко и надёжно различает комбинации 11,10,01 и 00. В зависимости от полученного сигнала, дешифратор замыкает один из четырёх выходных проводов и подаёт напряжение $\mathbf{U}_{вых}$ на нужный агрегат. Дешифратор ежеминутно решает тысячи подобных задач в

компьютере, распознав, например, по адресу нужную ячейку памяти и записав в неё заданную информацию (2). Или опять же по адресу определив ячейку памяти и считав из неё информацию. С помощью дешифраторов рассылаются в нужные места команды управления и элементы новых программ. О широком круге задач, для решения которых применяется дешифратор, говорят, в частности, многочисленные статьи о нём в популярной литературе. Такие, например, как «Дешифратор пространственного звука», «Преобразование двоичного кода в семисегментный», «Взломщики паролей», «Преобразование **к**-ичного кода в **кп**-ичный», «Декодер текста» и многие другие.

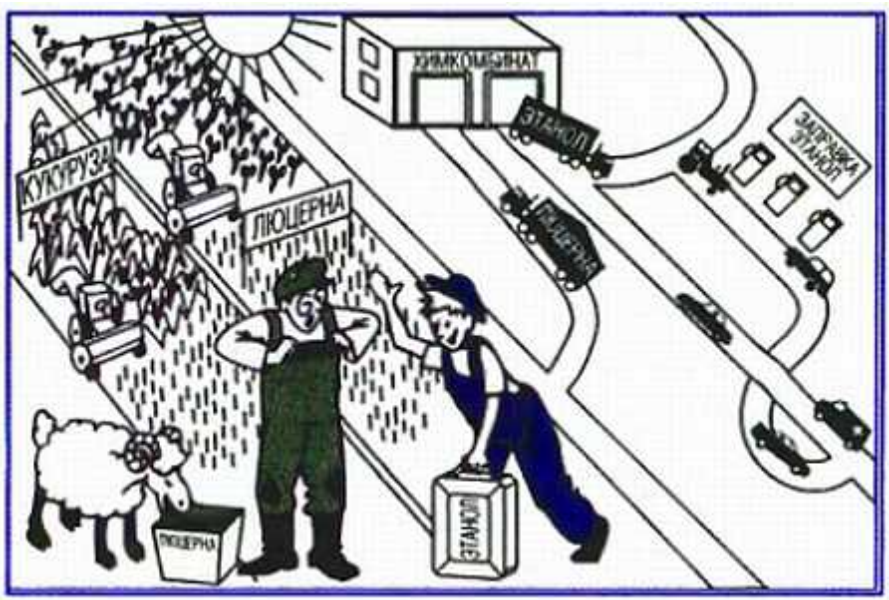
Т-229. **Бесшумные шаги минут.** Наручные электронные часы — один из самых дешёвых электронных приборов, говорят, оптовики уже продают их на вес чуть ли не по доллару за килограмм. А вместе с тем это устройство не такое уж простое, в нём сотни транзисторов и диодов, тактовую частоту отбивает высокостабильный кварцевый генератор, и погрешность обычно не более малых долей секунды в сутки. Генератор выдаёт сравнительно высокую частоту, за ним следует делитель частоты в виде длинной цепочки триггеров, на одном из её выходов появляются секундные импульсы тока, дальше более редкие минутные и часовые импульсы, а затем переключающие сигналы для календаря. Наконец, в часах имеется блок для установки нужного времени и даты и, конечно, жидкокристаллический экран с транзисторным переключателем цифровых сегментов. Есть электронные часы со стрелками и миниатюрным шаговым электродвигателем, на него поступают секундные импульсы, и дальнейшее замедление минутной и часовой стрелок осуществляют шестерёнки.

Сегодня электронные часы самый, наверное, рядовой представитель электроники, напоминающий при этом, что она умеет делать очень важное дело — отсчитывать время.

Т-230. **Главное дело электроники и её главный инструмент**. Вопрос «Кого ты больше любишь: папу или маму?» — вообще-то, запрещённый вопрос, лучше сказать, неуместный. Зачем это «больше», за которым обязательно следует «меньше»? Зачем это соревнование? Точно так же неуместно, думается, спрашивать, какая область электроники самая главная, — все они много делают для людей.

И всё-таки…

И всё-таки на широком фронте электронной техники одно направление надо бы выделить — это компьютеры. Сегодня компьютер можно, видимо, назвать главной электронной машиной, по крайней мере, по динамизму, по массовому к нему интересу, по тому, как он меняет нашу жизнь, как резко повышает эффективность любого дела, в которое включается. Вспомните: за несколько лет он изменил банковское и складское дело, учёт, многие области конструирования, научных исследований, управления производством, транспортом, снабжением, торговлей — список большой.



ВК-263. *За миллиарды лет до человека природа создала свои солнечные электростанции. Миллионы лет эволюции закрепили цепочки фотосинтеза: используя энергию солнечного света, они создавали молекулы, которые затем отдавали запасенную энергию растениям. В наше время растущих цен на нефть оказалось выгодным и безвредным из некоторых растений получать сохраняющие энергию спирты и понемногу (до 10–12 %) добавлять их в бензин. Это полезная временная мера до освоения новых источников энергии.*

Р-120. ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ — ДЕТАЛИ ДУМАЮЩИХ МАШИН. Очень давно, размышляя об устройстве мира, древние философы стали задумываться о способности человека логически мыслить. За прошедшие тысячелетия, особенно в последние годы, размышления о мыслящем человеке дали начало стройным теориям, которые, в частности, пытаются найти чёткое математическое описание того, что мы называем логикой. Кроме того, совсем уже недавно появились электрические управляющие машины, которые могут выполнить то, что до этого считалось монополией думающего человека. В таких машинах часто есть, как их называют, логические элементы, хотя, кажется, никто ещё не показал, что такие же точно элементы есть в живой материи, участвующей в логическом мышлении.

На рисунке показаны три основных типа логических элементов, применяемых в электронных схемах. Свое название «логические элементы» все они, видимо, получили потому, что их действия очень напоминают операции, который производит логически мыслящий человек.

Первый логический элемент (1) называют схема ИЛИ — она срабатывает и выдаёт на выходе импульс, если входной сигнал (импульс тока) подаётся на любой из входов — на первый вход, или на второй, или на оба сразу. Второй логический элемент (2) называется схема И — он срабатывает только в том случае, если входные сигналы подаются одновременно на оба входа, и на первый, и на второй. Наконец, третий логический элемент (3) называется схема НЕ (иногда пишут схема НЕТ) — она, как говорится, делает всё наоборот, и когда на её входе есть сигнал, на выходе сигнала нет, а когда на входе схемы сигнал исчезает, на выходе он

появляется.

Размышления и разговоры о персональных компьютерах в основном касаются программ, и это объяснимо. Во многом программа, или, как говорят, софт (в переводе «мягкая», то есть легко меняемая составляющая), определяет то, что вы можете получить от своей машины. Про «железо», то есть про компьютерную электронику, вспоминают нечасто. А жаль, каждый пользователь в каком-то объёме должен знать о ней, должен понимать, что и как она делает. Это не только справедливо, но чрезвычайно полезно — понимание сути дела всегда создаёт особое чувство спокойствия, уверенности. Эта короткая заметка не может, разумеется, заменить учебную книгу, но несколько фактов и цифр помогут если не понять, то почувствовать масштабы и уровень электронной схемотехники персонального компьютера.

И заметьте — компьютер поражает своей чёткостью и исполнительностью, несмотря на всю сложность и многообразие выполняемых операций, на огромное их количество, необходимое даже для простого перемещения курсора или стирания буквы. И несмотря на то что делается всё в бешеном темпе — миллионы действий в секунду. Только нажал клавишу — и твоя вычислительная машина тут же, что бы ты ни приказал, мгновенно и беспрекословно выполняет задание, сделав для этого, может быть, много тысяч невидимых чётко запланированных операций и пересылок сигнала.

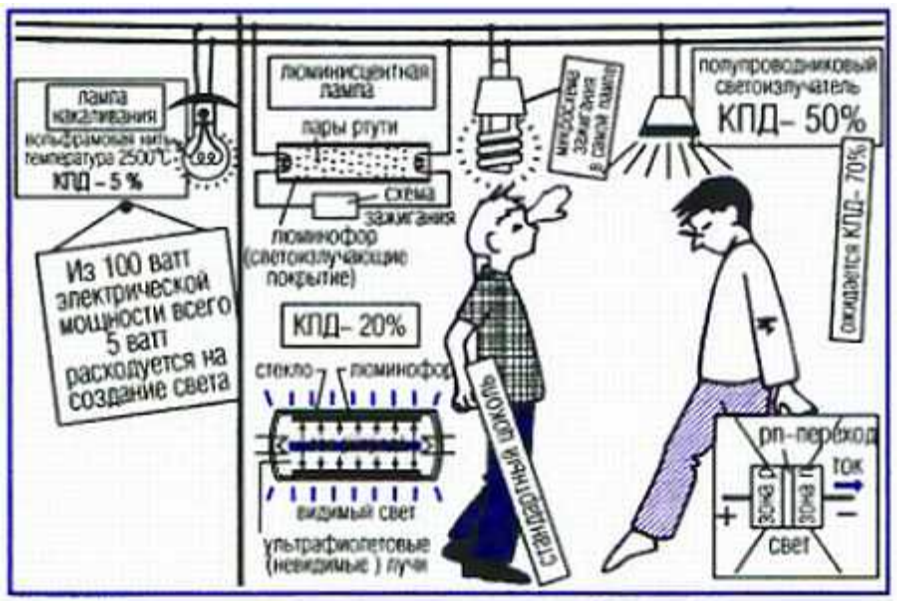
К сказанному нужно сделать два очень важных примечания.

Первое. Микропроцессор уже давно можно встретить не только в компьютерах. Несложные, в частности, четырёхразрядные варианты микропроцессора работают в лифте, автомобильном двигателе или в фотоаппарате и, самостоятельно выполняя десятки операций управления, освобождают человека от рутинных действий и размышлений. Какой-нибудь недорогой аппарат, приборчик и даже детская игрушка с микропроцессором — сегодня дело обычное.

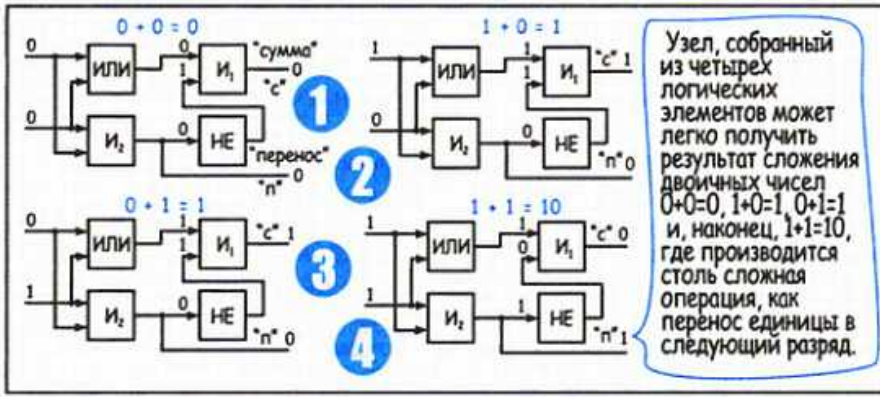
Второе. Несмотря на лавинообразный прогресс электронной схемотехники, не видать бы нам ни персональных компьютеров, ни доступных по цене цветных телевизоров, сотовых телефонов или видеокамер, если бы не малоизвестные широкой публике просто фантастические достижения технологов.

***Т-231*. Сумма технологий сделала электронику Электроникой.** Особенно хорошо чувствует прогресс технологии тот, кто своими глазами видел производство телевизоров или

приёмников лет 40–50 назад. По ленте очень длинного конвейера медленно двигалась основная схемная плата, и сидящие рядом вдоль всей ленты симпатичные девушки в белых халатах постепенно «набивали» её деталями. Одну за другой они ставили на эту плату контактные ламповые панели, разноцветные резисторы и конденсаторы, укладывали кусочки монтажного провода и небольшим паяльником делали нужные соединения, каждый раз оставляя на плате серебристую слезинку припоя. Попробуйте представить себе, как выглядело бы и, главное, сколько стоило бы такое производство персональных компьютеров, в каждом из которых фактически сотни миллионов и даже миллиарды деталей.



ВК-264. *Электричество без шума и копоти освещает наши жилища и городские улицы, превращает ночь в день. Кроме обычных лампочек накаливания выпускаются и другие более совершенные преобразователи сетевого электричества в свет. Это трубки (лампы) дневного света, в них создаётся невидимое излучение, которое заставляет ярко светиться специальную краску, покрывающую трубку изнутри. Это и светодиоды, которые, пропуская ток в прямом направлении, создают яркое свечение в* ***pn****-переходе.*



Р-121. СУММАТОР — ПРИМЕР РАССУЖДАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОНИКИ. В сложных электронных управляющих автоматах или в компьютерах бывает очень много различных логических элементов, которые небольшими и большими группами, или объединившись с другими элементами, например с триггерами, выполняют довольно сложные операции. Так, например, показанная на рисунке схема из четырёх логических элементов, которую обычно называют сумматор, складывает двоичные числа 0 + 0, 1 + 0, 0 + 1 и 1 + 1. Первые три операции выполняются довольно просто (0 + 0 = 0, 1 + 0 = 1 и 0 + 1 = 1), для всех трёх достаточно было бы одного логического элемента — одной схемы ИЛИ. А вот четвёртая операция (1 + 1 = 10) дело непростое. Потому что в двоичной системе счёта 1 + 1 = 10, то есть нужно в основном разряде получить 0 и единицу перенести в следующий разряд. Сейчас мы посмотрим, как решаются эти четыре задачи.

Во-первых, отметим, как при первых трёх операциях логический элемент ИЛИ, получив на свои два входа нули и единицы, выполнит все необходимые операции и мы получим на его выходе три правильных результата. Обратите внимание на то, что в нашей схеме результат получают не с этого элемента ИЛИ, а с дополнительного элемента $И_1$, которому ИЛИ передаёт свои результаты — в первой операции 0, во второй, третьей и четвёртой 1. Но элементу $И_1$ полученных от ИЛИ единиц недостаточно, элементу $И_1$, чтобы выдать необходимую во втором и третьем случае 1, нужно для этого получить 1 на оба своих входа. Вторую необходимую 1 элемент $И_1$ получит от элемента НЕ, который с элемента $И_2$

получает 0 и выдаёт 1, поступающую на второй вход $И_1$. Только в четвёртом случае, то есть при сложении 1 + 1, элемент НЕ с элемента $И_2$ получает 1 и выдаёт 0 на вход $И_1$, из-за чего он не может сработать и выдаёт 0, необходимый в этом случае для основного разряда. В то же время 1, направленная на вход элемента НЕ, по отдельному проводу ответвится и попадёт в соседний разряд — на выходе блока из четырёх логических элементов появится результат 1 + 1 = 10.

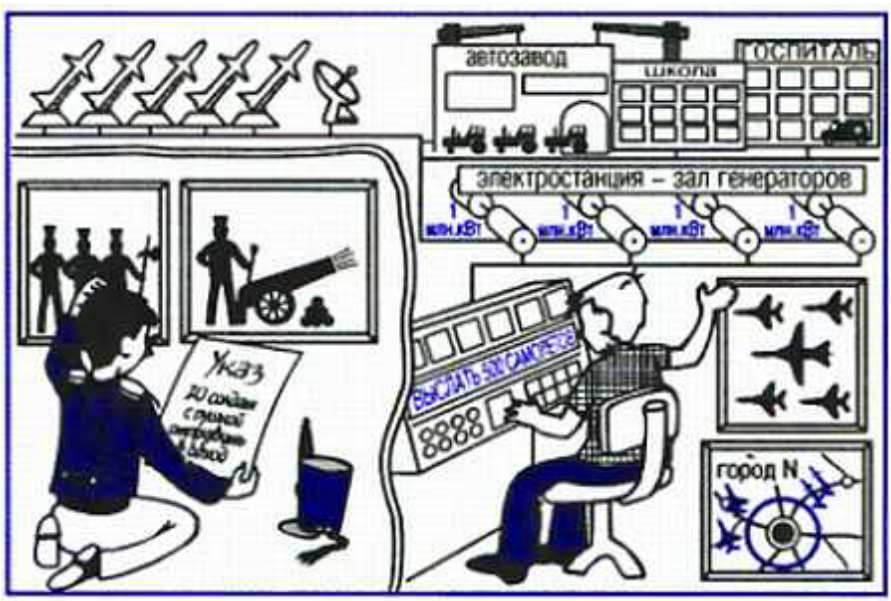
Первый удар по трудоёмкой ручной сборке электронных схем нанесли печатные платы — на них все соединительные цепи, все сотни отдельных проводков формировались в виде полосок тонкой медной фольги, причём формировались сразу, в едином технологическом процессе по имени фотолитография. В этом названии греческое слово «лито» (в переводе «камень») напоминает, что идея пришла от полиграфистов, они ещё лет двести назад использовали печатные формы на камне для тиражирования картинок.

В 1958 году, то есть примерно через 10 лет после рождения транзистора, был сделан следующий, едва ли не самый главный технологический рывок. Методами фотолитографии и введения примесей из газовой среды в одном полупроводниковом кристаллике сформировали сразу четыре транзистора, нанесли нужные соединительные линии и, как говорится, одним ударом получили электронный блок — первую полностью готовую четырёхтранзисторную интегральную схему, первый чип. В кристалле формировались также резисторы и конденсаторы, роль последних взял на себя рп-переход, на который подано обратное напряжение.

Технология интегральных схем быстро продвигалась вперёд и вскоре практически вытеснила из аппаратуры основные дискретные элементы — отдельные транзисторы, резисторы, конденсаторы. Через пару лет после создания первого чипа уже серийно выпускались интегральные схемы с десятками и сотнями элементов, сегодня рядовым и, кстати, довольно дешёвым стал кристалл, в котором миллионы схемных деталей. Причём выпускаются эти шедевры автоматами, без прикосновения человеческой руки — на большой кремниевой пластине формируется сразу несколько десятков интегральных схем, затем их тщательно проверяют, тоже, разумеется, автоматически, и, наконец, разрезают на отдельные кристаллы. Здесь уместно вспомнить ещё одно великое достижение технологов и совсем уже

невидимых миру машиностроителей. Сложный электронный блок уже и собирают автоматы — они сами с очень высокой точностью ставят на печатную плату детали, сразу производят все пайки, тщательно проверяют готовое изделие.

Увеличить число элементов в кристалле позволили новые технологии, а также давшийся недёшево прогресс фотолитографии. Она начинала с деталей миллиметровых размеров, затем технология преодолела микронный рубеж, и в 1998 году ведущие фирмы уже выпускали процессоры, где детали транзистора имели размер 0,25 микрона, то есть 250 нанометров. Чтобы подобная деталь стала размером с булавочную головку, её надо увеличить в 5000 раз, при таком увеличении сама булавочная головка превратится в двухэтажный дом. Через три года технологи уменьшили размер транзистора в микросхеме до 130 нанометров, ещё через три года — до 70 нанометров, а сейчас широко выпускаются микросхемы с размером деталей 45 нанометров и строятся новые заводы, которые будут делать микросхемы с транзисторами размером 22 нанометра. Если увеличить такой транзистор до размеров булавочной головки и саму её увеличить во столько же раз, то булавочная головка превратится уже в 20-этажный дом.



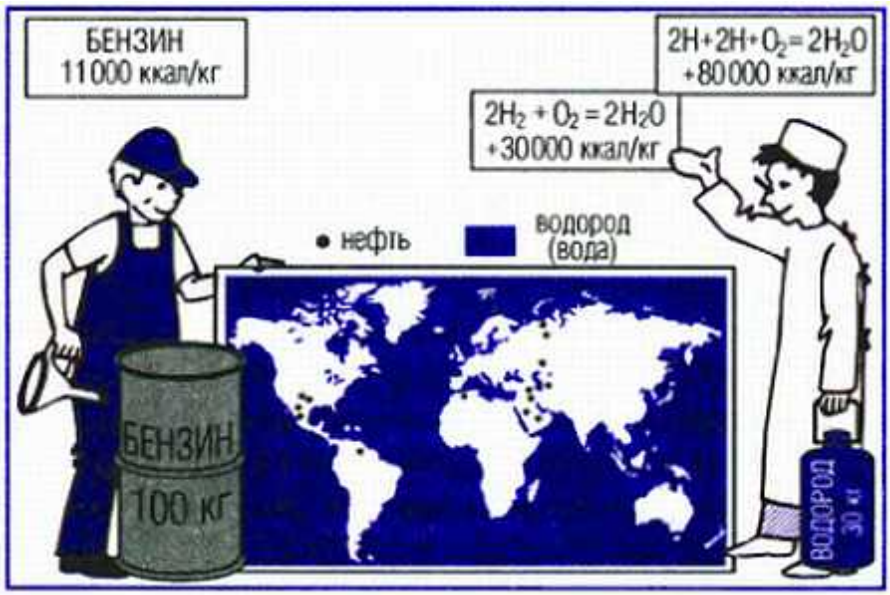
ВК-265. *Размышляя об электричестве и электронике, нельзя не вспомнить о чувствительных приборах и больших управляющих электронных устройствах в системе обороны страны. Их задача — вовремя обнаружить возникшую опасность и включить при*

необходимости средства защиты, детально отобразив события для операторов и военного руководства. Можно считать, что приборы оповещения и управления объектами обороны — важное слагаемое предохранения мира от большой войны.

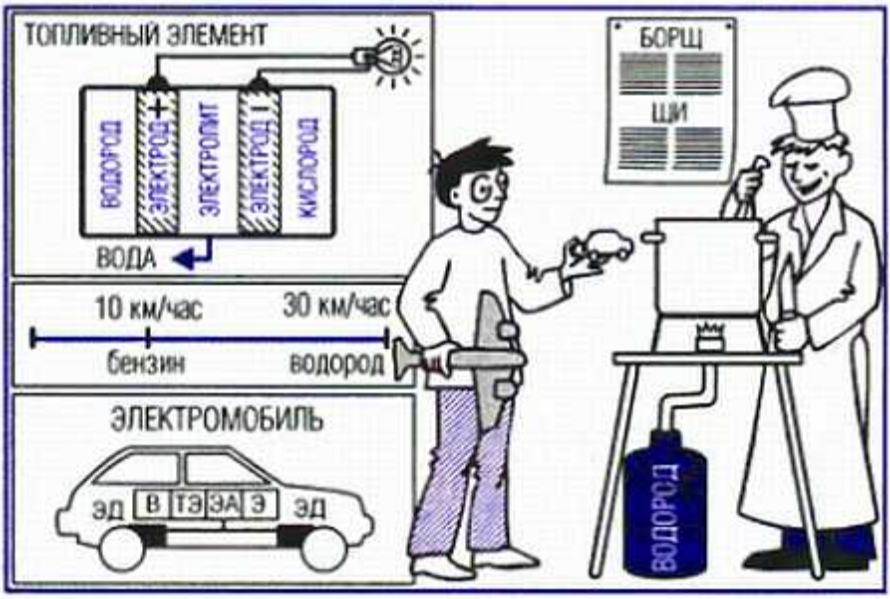
Уменьшение размеров деталей в чипе имеет ещё одну цель, в каких-то случаях весьма важную, — уменьшается время срабатывания полупроводниковых приборов, то есть компьютер работает быстрее. Это, кстати, отражено в одной из главных характеристик процессора — его тактовой частоте. Ещё лет десять назад лучшие процессоры работали с тактовой частотой до 160 МГц (мегагерц), сегодня она превышает 2 гигагерца, а иногда и 4. Это, видимо, ещё не предел.

Технологии изменили качественный уровень других устройств, нередко при этом сделав их более дешёвыми, более доступными. Появился, например, принтер, где цветная картинка создаётся микроскопическими капельками чернил, их в нужный момент и в нужное место (точность попадания — микроны) выстреливает цепочка тепловых или пьезоэлектрических насосов, опять-таки микроскопических. Технологии сделали массовым изделием столь сложный физический прибор, как лазерный диод с гетероструктурой, где меняется не только тип проводимости микрокристалла (зона р, зона п), но и сама его физическая природа.

Почти везде одна из основных технологических задач — миниатюризация и в перспективе даже переход на молекулярный уровень. Так что очень может быть, что круг замкнётся, и электронная техника придёт к молекулярным шедеврам информационных систем живой природы.



ВК-266. *Водород мог бы быть отличным поставщиком энергии для электрических машин, на этом и на следующем рисунке несколько подтверждающих это напоминаний. Простая химическая формула напоминает, что молекулярный водород H_2 при сжигании (соединении с кислородом O_2) отдает почти в 3 раза больше энергии, чем бензин. Атомарный водород H еще в 2,7 раза эффективнее. Водорода у нас очень много. Сжигание водорода не загрязняет атмосферу, остаток процесса — чистая вода.*



ВК-267. *В мае 1937 года, после двух дней полёта из Европы в Америку, при посадке взорвался заполненный водородом огромный (длина 245 метров) дирижабль Z-129. Эта трагедия стала началом недоверия общества к водороду, страха перед взрывами и пожарами, к запретам на его применение. Но всё же сегодня мы имеем отработанные технологии и немало надёжных водородных систем — от заправочной колонки до ракет, самолётов и авто. Проблема в другом — водород пока в несколько раз дороже бензина.*

Глава 21
Задачи на послезавтра

Инженеры соревнуются в изобретательности, фирмы конкурируют на рынке и в итоге промышленность непрерывно предлагает электрические новинки и новшества. Появление новой машины — процесс небыстрый, её надо придумать и продумать, сконструировать, выпустив альбомы чертежей, испытать опытные образцы и утвердить их в многочисленных контрольных комиссиях. А некоторые будущие новинки пока ещё находятся на стадии научных поисков и разработок, они, видимо, придут в жизнь (если придут) не очень скоро, так сказать, послезавтра. Но при этом принесут в электротехнику и энергетику принципиально новые подходы к жизненно важным задачам, которые непременно придётся решать человечеству, может быть, уже в ближайшие десятилетия.

***Т-232*. Стратегия стрекозы: не нужно особо задумываться о будущем, когда появятся проблемы — что-нибудь придумаем.** Жить, всякий знает, можно по-разному. Можно проводить время весело и беспечно, не думая о завтрашнем дне, эта стратегия не раз была представлена в художественной литературе, вспомните, например, басню «Стрекоза и муравей». Можно жить по-другому, полностью пожертвовать сегодняшним днём, все мысли, все силы отдать подготовке к неизвестностям будущего. В малых масштабах, в жизни отдельного человека, семьи подобные крайности встретишь редко, разве что вспомнится Плюшкин с его припрятанными на чёрный день сухарями. А вот всё человечество в целом, поглощённое суматохой текущих дел, о будущем нередко старается просто не думать. Посмотрите, с какой лёгкостью мы тратим уголь, нефть и газ, подбадривая себя порциями оптимизма: «Учёные уверены, что в недрах ещё очень много нефти, вполне хватит на 30 лет… А может быть, и на 40… Или даже на 50. Ура!».

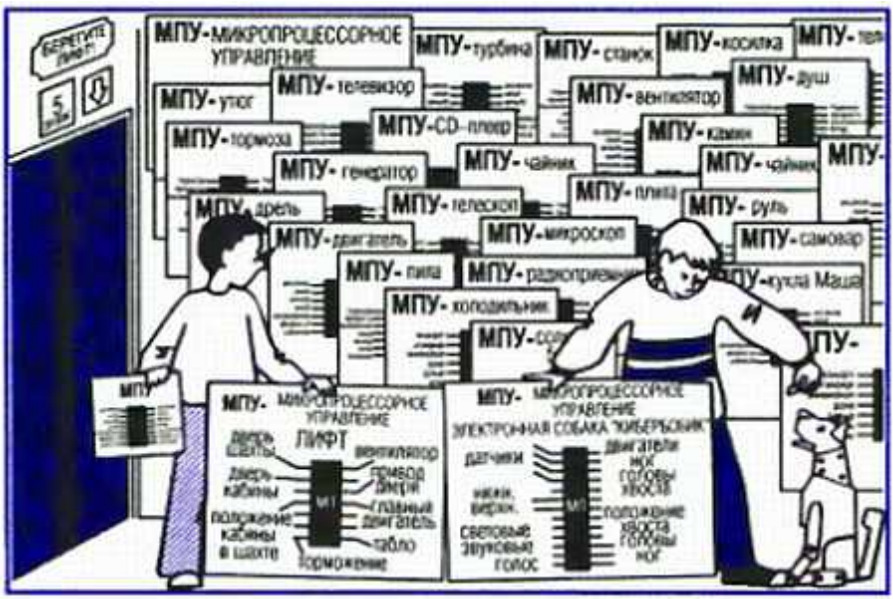
Нельзя сказать, что в части энергетики человечество ведёт себя совсем уж беспечно. Кое-что делается, хотя многие специалисты считают, что этого недостаточно, что автомобиль мировой цивилизации может остановиться, не доехав до следующей бензоколонки. А многие профессионалы, наоборот, настроены оптимистично, они отмечают, что поиск новых

крупномасштабных источников энергии ведётся на нескольких перспективных направлениях, почти на всех есть обнадёживающие результаты, а кое-где и реальные практические достижения.

Рядовому потребителю энергии наверняка хочется быть оптимистом, и поэтому ему интересно, видимо, хотя бы мельком взглянуть на эти новые перспективные направления и на то, как далеко они уже продвинуты вперед.

Т-233. **Бесплатное электричество из бесплатного света**. Возможности солнечной энергетики определяются одной цифрой, она имеет собственное имя солнечная постоянная и равна примерно 1,3 кВт/м^2. Это означает, что 1,3 киловатта солнечного тепла приходится на каждый квадратный метр вблизи Земли, например, на квадратный метр солнечной батареи космического корабля. На Землю через атмосферу приходит поменьше, в жарких странах, наверное, около киловатта, то есть со сравнительно небольшой площади, с квадратного километра, можно в полдень снять неплохой урожай энергии.

Нельзя не сделать и несколько охлаждающих дополнений. Солнце утром и к концу дня светит намного слабее, а ночью его свет на выбранную территорию вообще не попадает. Вместе с тем в малых масштабах солнечное электричество уже используется, не говоря уже о том, что оно кормит микрокалькуляторы и небольшие радиоприёмники, ретрансляторы радиорелейных станций, небольшие водокачки на отдалённых пастбищах и космические аппараты на орбите. Есть также экспериментальные солнечные электростанции без фотоэлементов — несколько десятков зеркал направляют солнечные лучи на небольшой паровой котёл, пар, как обычно, вращает турбину, а она — электрогенератор.



ВК-268. *Огромные человеческие силы, внимание и время сберегают миллионы сложных и очень простых (пять-десять деталей) электронных схем, управляющих различными процессами, как, например, движением щёток стеклоочистителя. В последнее время для этого широко используют МПУ — микропроцессорное управление. Его основа — выполненный в виде интегральной схемы сильно упрощённый компьютерный блок микропроцессор, управляющий разными устройствами — от турбины до куклы.*

Большая энергетика тоже не отказывается от бесплатного солнечного тепла, в литературе появляются довольно смелые проекты, вот один из них. На стационарную околоземную орбиту выводятся огромные солнечные батареи, и собранную ими электроэнергию мощные передатчики с помощью остронаправленных антенн посылают на Землю в виде луча СВЧ-радиоволн. А вот другой проект. Часть электростанции размещают на аэростате, он поднят выше облаков, а собранную энергию превращают в перегретый пар и по трубопроводу направляют его в паровую турбину, которая стоит на земле и вращает ротор электрогенератора. У подобных фантастических проектов, конечно, сразу же появляются серьёзные критики, но опыт учит, что с отрицательными прогнозами торопиться не нужно.

Т-234. **Атомная энергия — из претендентов в конкуренты**. В любом источнике энергии, если разобраться, на нас работают одни и те же машины — атомы и молекулы. Многие

из них очень давно получили свои энергетические запасы и теперь в разных физических процессах передают их друг другу и отдают нам. При этом работают атомы и молекулы в двух разных режимах — отдают энергию, запасённую либо в своих электронных оболочках, либо в своих атомных ядрах. В первом случае — это химия, в частности, реакции окисления, то есть горение, которым сегодня в основном и питается энергетика. Атомное ядро значительно более мощный источник, чем электронные оболочки, — ядерные реакции позволяют получить от атома в тысячи раз больше энергии, чем при его традиционном сжигании.

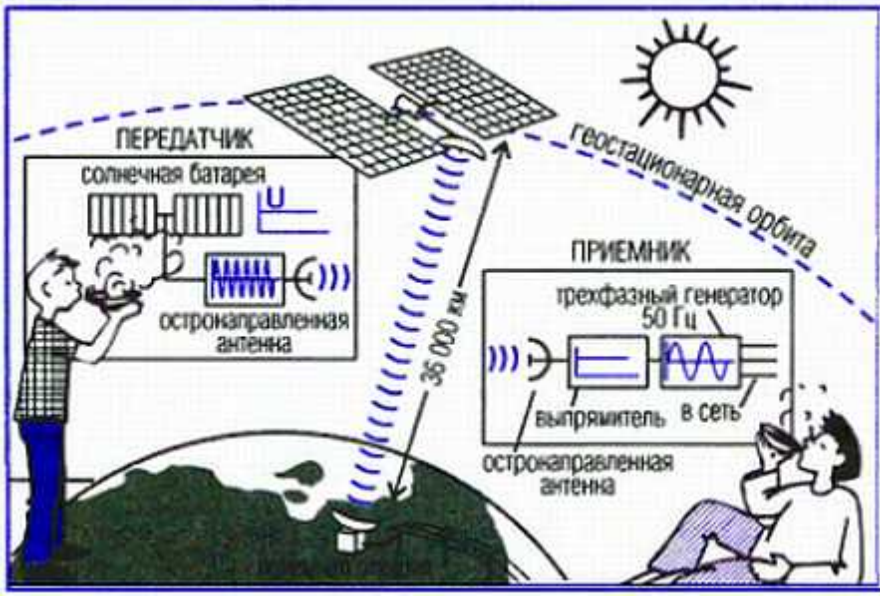
Существует два вида ядерных процессов, которые сопровождаются выделением энергии. Первый — это реакции деления, когда крупное ядро разваливается на более мелкие. Второй вид реакций, выделяющих энергию, — это синтез, когда два ядра сливаются в более крупное ядро. Уже много лет работает в энергетике цепная реакция деления ядер урана или плутония, распадаясь в атомных реакторах, они выделяют тепло, а дальше всё идёт по обычной цепочке: пар, паровая турбина, электрогенератор. При распаде уранового ядра из него вылетают нейтроны, некоторые попадают в другие ядра, разваливают их, из тех опять вылетают нейтроны, и процесс сам себя поддерживает — идёт цепная реакция. В атомной бомбе она развивается очень быстро, лавинообразно. В энергетическом реакторе, воздействуя на поведение нейтронов (например, перемещая графитовые стержни-замедлители), автоматика с многочисленными защитными системами управляет ходом цепной реакции, поддерживает медленное, спокойное «горение» урана.

Ещё лет 70–80 назад было понятно, что в принципе можно добывать энергию из атомного ядра, но даже ведущим профессионалам это казалось безнадёжным для практики делом. Вместе с тем через два-три десятилетия появились первые атомные электростанции, а сегодня в мире их уже больше сотни — атомная энергетика стала работающей реальностью. Но оказывается, что урана, который нужен для атомных реакторов электростанций, тоже не так уж много в земных недрах, кто-то подсчитал, что его, как и нефти, хватит на 30, максимум на 50 лет. Так что ядерная энергетика, основанная на реакциях деления, уже тоже должна думать об ограниченности запасов своего топлива. Этой проблемы практически не будет, если энергетика сумеет приручить известную ядерную реакцию синтеза — слияние ядер водорода в ядро гелия. Водород можно брать из воды, а её у нас достаточно — океаны. Для водородного синтеза нужен, правда, не только обычный, а ещё и тяжёлый

водород дейтерий (изотоп, у которого в ядре кроме протона есть ещё и нейтрон), но его в Мировом океане тоже немало, хватит на миллионы лет.

Т-235. **Термоядерный синтез — сквозь тернии к звезде.** При слиянии ядер водорода (на самом деле водорода и дейтерия) выделяется во много раз больше энергии, чем при распаде атома урана, но воспользоваться этим не так-то просто. Электричество — вот главное препятствие на пути получения электроэнергии из реакций водородного синтеза. Ядро водорода — это протон, частица с положительным электрическим зарядом. Чтобы объединить два ядра протона, их надо сблизить, а при сближении этих двух «плюсов» они, естественно, взаимно отталкиваются. В какой-то момент ядерные силы преодолеют электрическое расталкивание, соединят два протона в одно ядро гелия, но могучие ядерные силы начинают действовать на очень малом расстоянии, чтобы прийти к нему, нужны огромные усилия, которые помогли бы преодолеть электрическое расталкивание протонов.

Водородный синтез — источник энергии звёзд, в том числе нашего Солнца, там протоны сближаются в основном благодаря огромному давлению в недрах звезды. В водородной бомбе этот процесс сверхсильного сжатия воспроизводится урановым взрывателем. Чтобы создать земной термоядерный реактор, создать спокойно работающую небольшую звезду, можно нагреть газообразный водород до нескольких десятков миллионов градусов. При такой температуре газ превратится в плазму, покинутые электронами ядра водорода (протоны) будут метаться с огромными скоростями (Т-8), набирая очень большую энергию, которая и преодолеет их электрическое расталкивание. Так что ключ к добыванию энергии из реакций водородного синтеза — это сверхвысокие температуры. Отсюда и название управляемый термоядерный синтез, сокращённо УТС, или, как уже давно принято называть его, термояд.



ВК-269. *Несколько японских и американских фирм сообщили, что приступают к созданию орбитальных солнечных электростанций. Огромные солнечные панели каждой станции (их объявленная площадь — несколько квадратных километров) специальными преобразователями будут круглосуточно превращать солнечное излучение в сантиметровые радиоволны, которые острым лучом перенесут электрическую энергию на Землю в антенну приёмного центра, выдающего в итоге стандартный переменный ток.*

Ещё полвека назад московские физики для термоядерных экспериментов придумали установку с загадочным названием ТОКАМАК, от слов ТОроидальная КАмера, МАгнитная Катушка. В установке водородная плазма находится в большой, напоминающей бублик, камере, на неё надета катушка, выполняющая роль первичной обмотки трансформатора, и с её помощью по плазменному кольцу внутри камеры, как по вторичной обмотке трансформатора, идёт очень сильный ток. Он и нагревает плазму до необходимых термоядерных температур. А чтобы огненное кольцо плазмы не касалось стенок, его удерживают в центре камеры сильным магнитным полем, которое создаётся катушкой, навитой на «бублик». К сожалению, к этой красивой идее природа сделала своё дополнение: из-за каких-то поначалу непонятных хаотических процессов плазменное кольцо почти сразу же разрушается, и плазма падает на стенки, теряя температуру.

За 50 лет в разных странах было построено много токамаков, с поразительным упорством изучались неустойчивости плазмы, из понимания физических процессов появлялись практические выводы и технические решения, шаг за шагом исследователи продвигались к термоядерному реактору. Один из выводов: реактор должен был большим. Для постройки огромного, а значит, дорогого токамака собралась международная команда в рамках проекта ИТЕР, что после расшифровки и перевода означает: Международный экспериментальный термоядерный реактор. Десять лет шло проектирование реактора, оно стоило 4 миллиарда долларов, поскольку включало много исследовательских работ и изготовление опытных образцов важнейших элементов всей системы — от стенок камеры до сверхпроводящих магнитов. Сейчас проект ИТЕР готов, реактор уже начали строить на юге Франции, недалеко от Марселя. И хотя установка экспериментальная, на ней есть надежда получить «зажигание» — устойчивую термоядерную реакцию, которая сама себя поддерживает, а не потребляет энергию, как было до этого. Так что, возможно, вскоре будет сделан решающий шаг к тому, чтобы стала реальностью пока ещё вполне фантастическая картина: на берету океана (моря, озера, реки) стоит мощная электростанция, основным топливом для которой служит вода.

Т-236. **И снова водород, на этот раз как выгодный посредник**. Часто встречаемое словосочетание «водородная энергетика» никак не связано с термоядерным синтезом, имеется в виду водород как своего рода посредник, как хранитель больших запасов энергии — нечто вроде нефти. Водород, так же как нефть и нефтепродукты, соединяется с кислородом, то есть горит, выделяя тепло. Но только тонна водорода выделяет в 5 раз больше тепловой энергии, чем тонна нефти. К тому же, в отличие от нефти, водород в принципе можно будет сравнительно недорого производить, например, на орбитальных химических комбинатах с помощью бесплатной солнечной энергии.

Есть уже немало примеров успешного применения водорода в энергетических машинах. Например, летавшие на Луну американские космические корабли «Аполлон» получали электропитание от топливных элементов, где исходную энергию давало медленное окисление водорода. В своё время был построен автомобиль «Москвич» с водородным двигателем вместо бензинового. Крупные авиастроительные фирмы разработали проект большого пассажирского самолёта с водородными двигателями, такой машине на длительный полёт хватит всего 5–6 тонн водорода вместо 20–30 тонн обычного нынешнего топлива. Намного проще, чище и компактнее должны стать тепловые

электростанции, если с мазута или угля они перейдут на водород.

Одно только плохо: водород — опасный хранитель энергии. Смешиваясь с воздухом, он образует так называемый гремучий газ, который от какой-нибудь случайной искры мгновенно взорвётся со страшной разрушительной силой. Энтузиасты, конечно, предлагают разные варианты абсолютной защиты от утечки водорода, но пока его всё же не выпускают за пределы экспериментальных машин. Хотя крупномасштабная водородная энергетика неизменно считается весьма перспективным направлением.

ВК-270. *Получить большую энергию от водорода (точнее, его изотопов) можно, превратив 2 водородных ядра и 2 нейтрона в ядро гелия. Так создаётся излучение звёзд. В реакторе плазму (смесь атомных ядер) нагревают до 200 миллионов градусов, и частицы, преодолев электрическое расталкивание, входят в зону действия ядерных сил. Чтобы на стенки камеры не упала плазма, её подвешивают в магнитных полях. Группа стран строит мощный термоядерный реактор ИТЭР, и он может стать началом новой энергетики.*

Т-237. **Солнечную энергию можно, оказывается, использовать и старым способом**. Прекрасно приспособились к добыванию солнечной энергии растения. С её помощью они в процессе фотосинтеза строят много разных сложных органических соединений, из некоторых, как из топлива, человек

много тысячелетий добывает и использует накопленную в них солнечную энергию. На разговорном языке это, конечно, называется проще: получение тепла путём сжигания древесины, что когда-то было главной энергодобывающей технологией. Сегодня её используют лишь сельские жители и любители поджарить шашлык на природе, но, как ни странно, в век атомных реакторов и космических проектов к этому старому способу обращено внимание серьёзных специалистов, думающих о перспективах большой энергетики. Только они имеют в виду не привычное сжигание дров, а известный процесс получения топливного масла либо горючего газа из, так сказать, тлеющей древесины. Это крупномасштабное производство может быть развёрнуто в больших таёжных массивах, откуда газ по трубопроводам или в сжиженном виде в баллонах будет поступать в районы с большим потреблением энергии. Есть и другие варианты использования энергии, добытой растениями с помощью фотосинтеза, в качестве примера можно назвать получение спирта из сои.

Можно восторженно поддерживать проекты новой растительной энергетики, можно строго их критиковать и даже посмеиваться над ними, но нельзя пренебрегать данными, полученными из учебников биологии. Растительный мир планеты, используя солнечную энергию, ежегодно создаёт 100 миллиардов тонн органических веществ, в них содержится количество энергии, эквивалентное 5 триллионам тонн нефти, в 200 раз больше нынешней мировой добычи за год. Достаточно 0,1 % этого количества, чтобы обеспечить топливом все электростанции мира.

ВК-271. *Ну вот и подошли мы к концу большого пути, который прошли вместе с двумя нашими помощниками — главными героями «Весёлого конспекта». Многое из того, что встретилось на этом пути, осталось в памяти и теперь будет помогать нам двигаться дальше. При этом понимание чисто технических, казалось бы, процессов поможет участвовать в благородном деле распределения и использования электрических сил и возможностей с максимальной пользой для общества, для людей, работающих рядом с нами.*

Т-238. **Во всех случаях нужно помнить о главном.** Рассказывают, что Наполеон приехал как-то к своим артиллеристам и стал их строго отчитывать: «Вы почему такие-сякие вчера не стреляли? Из-за вас чуть всё сражение не проиграл…». «У нас, — ответили артиллеристы, — было на то 18 причин. Во-первых, у нас не было снарядов, во-вторых…». «Стоп, дальше не надо», — прервал Наполеон. И действительно, о чём ещё говорить, если не было снарядов, без них пушки не стреляют.

Эта история напоминает, что во всяком деле есть стороны важные, очень важные и не очень важные. И есть нечто, самое важное, самое главное, именно его нужно как-то выделить и сделать главным предметом внимания. Напоминание «Думай о главном!» наверняка поможет при решении самых разных производственных, деловых и личных задач. В том числе задач из таких областей, как электротехника и электроника, где всегда много взаимосвязанных событий, а поэтому легко запутаться и

утонуть в подробностях, слабо влияющих на ход дела.

Каждому, даже самому что ни на есть рядовому человеку приходится соприкасаться с очень важными проблемами. Это проблемы общепоселковые и общегородские, общегосударственные или даже общечеловеческие — проблемы всей нашей цивилизации. Конечно, человеку со стороны, непрофессионалу, то есть не президенту, не премьер-министру и не королю, непросто разобраться в проблемах такого масштаба и тем более правильно выделить в них самое главное. Особенно при нынешних мощнейших потоках информации, разной как по форме, так и по содержанию, вплоть до откровенной дезинформации. Но вот неожиданно приходит помощь из далёкого прошлого. Один из древнегреческих философов напоминает нам безошибочную и на все случаи жизни формулу для определения и оценки самого главного: «Мера всего — человек». Это означает, что во всех делах, при решении любых проблем самое главное — человек. Его жизнь, здоровье, благополучие, безопасность, уверенность в завтрашнем дне, честность, будущее детей, коротко говоря, его счастье. Именно о человеке, о людях, о тех, с кем ты связан, и особенно о тех, кто как-то зависит от тебя и твоего дела, ты должен думать прежде всего. Потому что мера всего — человек.

Напутствия с надеждой

Прочитав книгу или даже для начала просто просмотрев её, читатель наверняка увидел что-то для себя полезное, интересное и важное. Книга, например, напомнила о том, какой подарок после Большого взрыва мы получили от природы в виде особых электрических сил в микрочастицах. Сил, не очень еще понятный источник которых мы называем электрический заряд. Книга рассказала о том, как человек, натирая тряпкой янтарь (по гречески — электрон), обнаружил эти силы и через много лет научился использовать их — вращать миллионы больших и малых электрических моторов, зажигать миллиарды электрических ламп и, главное, используя другие виды энергии создавать огромные электрические мощности и в нужных небольших количествах доставлять их практически в каждый дом, где живут люди. Книга рассказала о многих конкретных технических решениях и аппаратах, позволяющих эффективно добывать, перебрасывать на большие расстояния и использовать электричество. Вместе с тем рассказанное — лишь небольшая часть того, что делает электричество во Вселенной и, особенно, у нас на Земле в живой природе.

Книгу подобную этой не прочтешь, как говорится, залпом, за несколько дней. О чем-то нужно подумать, к чему то вернуться, повторить. Вы видели, что этому способствует сама структура книги — сравнительно небольшие разделы Т позволяют еще раз просмотреть какую-либо конкретную тему. Особо полезны в этой части рисунки — все они снабжены расширенными подписями и с ними можно знакомиться, даже оторвавшись от основного текста. Надеюсь, что используя эти особенности книги, читатель извлечет из неё знания об электричестве, полезные для человека любой профессии.

В заключение хотелось бы выразить благодарность Международной компании «IPG-PHOTONICS», оказавшей помощь в формировании и издании книги. Хочу также поблагодарить своего компьютерного наставника (индийцы сказали бы гуру) инженера Сергея Делова, сделавшего для автора доступным столь могучего помощника, как персональный компьютер.

15 ноября 2012 года

Руд. СВОРЕНЬ.

* * *

Книги издательства «ДМК Пресс» можно заказать в торгово-издательском холдинге «Планета Альянс» наложенным платежом, выслав открытку или письмо по почтовому адресу:

115487, г. Москва, проспект Андропова, д. 38.

При оформлении заказа следует указать адрес (полностью), по которому должны быть высланы книги; фамилию, имя и отчество получателя.

Желательно также указать свой телефон и электронный адрес.

Эти книги вы можете заказать и в интернет-магазине: www.alians-kniga.ru. Оптовые закупки: тел. (499) 782-38-89.

Электронный адрес: books@alians-kniga.ru.

Сворень Рудольф Анатольевич
Электричество шаг за шагом
Главный редактор *Мовчан Д. А.* dmkpress@gmail.com
Дизайн обложки *Сворень Светлана, Бениаминов Никита*
Оригинал-макет подготовлен Фондом "Наука и жизнь"
Формат 70x100-1/16.
Уел. печ. л. 28,75. Тираж 500 экз.
Сайт издательства: www.дмк.рф